Г. К. ЖЕРВЕ

# РАСЧЕТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПЕРЕМОТКЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Ленинград 1952 Москва

ЭЭ-3(4)-3

*В книге приведены сведения, необходимые для подготовки машины к расчету, дан обзор применяемых систем якорных обмоток с разбором их основных свойств, достоинств и недостатков, изложены правила составления схем и таблиц обмоток и обоснование их выбора. Подробно рассмотрен вопрос о выборе числа витков и сечения обмотки якоря. Указан способ примерного предварительного определения мощности рассчитываемой машины.*

*Изложение иллюстрировано рядом примеров. Дается необходимый справочный материал.*

*Книга предназначена для квалифицированных рабочих и техников, занимающихся ремонтом машин постоянного тока.*

## ОТ АВТОРА

В нашей технической литературе до сих пор совершенно отсутствовали руководства по расчету машин постоянного тока, доступные для широких кругов электротехников, не имеющих специальной подготовки в области расчета электрических машин.

Настоящая книга имеет целью восполнить этот пробел. Она призвана удовлетворить тем же потребностям, что и вышедшая в 1951 г. книга того же автора „Расчет асинхронного двигателя при перемотке".

Автор приносит глубокую благодарность инж. Н. В. Куликову и лауреату Сталинской премии инж. И. Н. Рабиновичу за ряд ценных указаний в процессе подготовки книги.

Все замечания и пожелания по этой книге просьба направлять Ленинградскому отделению Государственного энергетического издательства по адресу: Ленинград, Невский пр., 28.

## СОДЕРЖАНИЕ



### Приложения

## Введение

Машина постоянного тока является наиболее сложной из всех электрических машин, за исключением, быть может, мало распространенных коллекторных машин переменного тока, отдельные конструкции которых отличаются еще большей сложностью. Вместе с этим машина постоянного тока легче подвергается повреждениям, а ремонт и восстановление ее связаны с некоторыми трудностями.

Машины постоянного тока распространены в гораздо меньшей степени, чем машины переменного тока; между тем машина постоянного тока обладает рядом ценных качеств, которые не могут быть возмещены общеизвестными достоинствами машин переменного тока.

Так, например, ни один двигатель переменного тока не может конкурировать с двигателем постоянного тока в отношении возможности регулирования скорости вращения при параллельном и смешанном возбуждении или способности к перегрузкам при последовательном возбуждении.

Никакой источник переменного тока не сравнится с генератором постоянного тока в легкости регулирования напряжения.

Все это вместе взятое заставляет особенно внимательно относиться к машинам постоянного тока как к источникам механической и электрической энергии в особенно гибкой форме.

Большая потребность в машинах постоянного тока, возникающая по этим причинам, безусловно не могла бы быть удовлетворена предприятиями электропромышленности, если бы им на помощь не приходили многочисленные электроремонтные мастерские при промышленных предприятиях, электростанциях, ремесленных училищах и организациях промысловой кооперации, занимающиеся восстановлением и ремонтом пришедшего в негодность электрооборудования.

Однако в практике приходится иметь дело не только с ремонтом и восстановлением. Номинальные данные машин постоянного тока, в которых встречается потребность, бесконечно разнообразны; между тем трудно рассчитывать на то, что всегда в наличии найдется машина с подходящими данными. Поэтому нередко возникает вопрос о перемотке совершенно

исправных машин на новые данные — напряжение и скорость вращения, требуемые новыми условиями использования машины.

Во всех таких случаях необходимо произвести расчет перематываемой машины. Если при перемотке асинхронных двигателей дело нередко ограничивается изменением данных „наглазок“, и перемотанные двигатели все же работают, то в машинах постоянного тока подобный метод совершенно неприемлем: перемотанные таким образом двигатели не развивают положенной скорости вращения, генераторы не дают заданного напряжения, у тех и других перегреваются обмотки и т. п.

В существующей технической литературе отсутствуют руководства по расчету машин постоянного тока в условиях перемотки. Задачей настоящей книги является восполнить этот пробел, дав широким кругам электротехников-практиков доступное руководство по расчету машины постоянного тока с готовым сердечником и коллектором.

Содержание книги ограничено машинами общего назначения без компенсационных обмоток. Оно построено так, что для его понимания требуется только знание основ алгебры, но зато предполагается, что читатель знаком с устройством машины постоянного тока и взаимодействием ее частей и что ему известны основные понятия и законы электротехники.

Вопросам технологии обмоток уделено внимание лишь в той степени, в которой они влияют на расчет машины.

---

# 1. ТИПИЧНЫЕ СЛУЧАИ ПЕРЕМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

При перемотке машин постоянного тока могут встретиться следующие типичные случаи.

*Случай 1.* Обмотки машины частично или полностью повреждены, но остатки их сохранились настолько, что по ним вполне могут быть восстановлены обмоточные данные всех обмоток, т. е. определены числа их витков, размеры сечений проводника и схема обмотки.

Требуется восстановление обмоток с сохранением всех данных машины — мощности, напряжения и скорости вращения, указанных в ее фирменном щитке.

Первое впечатление таково, что ни о каком расчете здесь не может быть речи; стоит лишь выполнить все точно так, как оно было. Но в этом-то и состоит дело: точное воспроизведение первоначальных данных не всегда возможно. Так, например, иногда не удается уложить в пазы якоря то количество проводников и тех размеров, которые были до перемотки. Это может происходить по разным причинам: изоляция проводника или катушек могла быть при первоначальном изготовлении тоньше той, которую в состоянии применить ремонтирующая организация; завод-изготовитель мог применять какие-нибудь приемы, недоступные в кустарном производстве; наконец, просто в наличности может не оказаться проводника нужных размеров или нужной марки, и его придется заменять более или менее подходящим.

Каждое такое отступление от первоначальных данных должно сопровождаться соответствующим расчетом для проверки его возможных последствий.

*Случай 2.* Условия те же, что и в предыдущем случае, но требуется заодно перемотать машину на новое напряжение с сохранением скорости вращения и мощности.

Необходимость расчета здесь уже очевидна, и вопрос далеко не всегда может быть решен в положительном смысле, в особенности когда дело касается относительно крупных машин, перематываемых с более высокого напряжения на более низкое, так как его решение может быть ограничено с одной

стороны невозможностью удовлетворения условий выполнимости обмотки якоря, а с другой — недостаточностью размеров коллектора.

*Случай 3.* Условия те же, что и в предыдущем случае, но требуется перемотать машину на новую скорость вращения.

Здесь необходим уже полный перерасчет машины, так как прежние данные теряют силу; мощность машины не сохраняется, вопрос о напряжении отходит на задний план—при полной перемотке безразлично, на какое напряжение вести расчет. В большинстве случаев в машинах более крупных мощностей приходится при этом менять тип обмотки в тех пределах, которые допускаются условиями выполнимости.

Приблизительная величина мощности при новой скорости вращения может быть определена заранее на основе сравнения с мощностью при прежней скорости вращения.

*Случай 4.* Прежние обмотки не сохранились, так что данные их неизвестны; но заводский щиток на машине имеется. Требуется восстановить машину так, чтобы она соответствовала данным своего щитка.

По сравнению с предыдущими случаями задача здесь усложняется; нужно найти те соотношения, которые были положены в основу расчета машины при ее первоначальном изготовлении, что удается далеко не всегда, а если и удается, то не всегда может быть выполнено по причинам, изложенным при рассмотрении случая 1. Поэтому нужно заранее оговорить, что прежняя мощность может и не быть достигнута. Решение задачи следует считать удовлетворительным, если новая мощность достигнет 85—90% от первоначальной.

*Случай 5.* Условия те же, что и в предыдущем случае, но заводский щиток не сохранился и потому первоначальные данные машины неизвестны.

Очевидно, этот случай является наиболее полным и наиболее сложным из всех; при нем требуется рассчитать машину на заданную мощность при заданной скорости вращения и заданном напряжении, т. е. в первую очередь определить, может ли она быть выполнена на эту мощность.

Определение наибольшей мощности, которая может быть получена от машины при заданной скорости вращения, неосуществимо без опытной проверки; только посредством испытания машины, выполненной по расчету, может быть окончательно определена ее мощность; расчет же дает лишь ее приблизительную величину.

При этом вопрос о напряжении играет роль только в том отношении, что в машинах средних и крупных мощностей при очень малых числах проводников в пазу крайне трудно подгонять удовлетворительные магнитные нагрузки отдельных участков магнитной цепи машины; вопрос же об изоляции не играет существенной роли, так как толщина последней при

всех встречающихся напряжениях до 500 *в* включительно может считаться практически неизменной.

Все возможное разнообразие встречающихся на практике случаев не исчерпывается, конечно, перечисленными пятью, но они являются наиболее характерными. В дальнейшем изложение построено применительно к последнему, наиболее общему и сложному из них.

## 2. ОБМЕР МАШИНЫ

Исходными данными при перерасчете машины постоянного тока являются размеры всех частей ее магнитной цепи: сердечника якоря, главных и добавочных полюсов и станины, а также коллектора.

Поэтому, приступая к расчету, необходимо прежде всего произвести обмер всех этих частей машины; от правильности данных обмера зависит правильность и расчета, сделанного на основании этого обмера.

В особенности важными являются размеры наиболее сложной в конструктивном отношении части машины—ее якоря; поэтому обмер его сердечника должен быть произведен со всей возможной тщательностью.

Перед обмером все внутренние части машины должны быть очищены от сохранившихся на них остатков прежних обмоток и их изоляции, краски, лака, грязи и ржавчины.

Для очистки лучше всего пользоваться тряпкой, смоченной в керосине или толуоле (осторожно от огня!); более крепко приставшие частицы удаляются при помощи шабра; внутренность пазов якоря удобно протирать веревкой, смоченной в керосине. Ни в коем случае не следует пользоваться для очистки пилами, хотя бы и с мелкой насечкой, так как ими можно непоправимо испортить детали машины, в особенности сердечник якоря.

Из всего множества размеров, которые могут быть сняты, следует выбрать только те, что совершенно необходимы для расчета.

### А. Сердечник якоря

1. Наружный диаметр якоря $D$ (рис. 1) измеряется посредством штангенциркуля с достаточно длинными губками, а если его нет, то при помощи слесарного кронциркуля и масштабной линейки; в небольших якорях можно также применить микрометр, хотя даваемая им высокая точность измерения—до сотых долей миллиметра—обычно является излишней.

При измерении нужно следить за тем, чтобы губки измерительного инструмента опирались на середины зубцов, находящихся по концам одного и того же диаметра; если же число

пазов на якоре нечетно, так что на одном конце диаметра находится зубец, а на другом паз, то можно в этот паз вбить деревянный клин, который затем тщательно обстрогать вровень с зубцами.

За действительный диаметр якоря должно быть принято среднее из нескольких измерений, произведенных в разных точках по длине сердечника и по его окружности.

2. Полная осевая длина сердечника якоря $l_n$ измеряется при помощи штангенциркуля, а при отсутствии его — масштабной линейкой; следует лишь отметить, что это

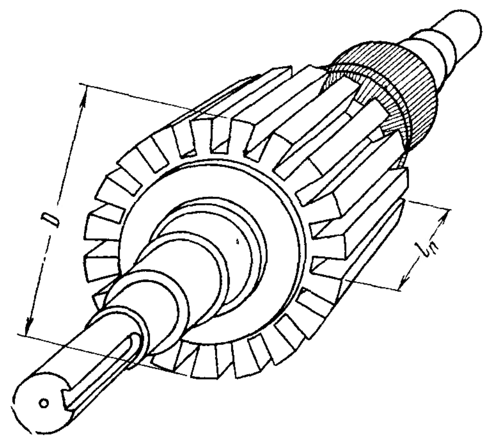


Рис. 1. Основные размеры якоря

измерение надо производить не по наружной поверхности якоря, а по дну пазов, так как крайние листы в зубцах могут при недостаточной жесткости отгибаться наружу („давать веер"), как показано на рис. 2.

3. Число зубцов или пазов якоря $Z$ определяется счетом.

4. Размеры пазов якоря определяются в зависимости от их формы.

В более крупных машинах применяются пазы прямоугольной формы двух разновидностей: с клином и без него (рис. 3). В первых измерению подлежат: полная глубина $h_n$, высота места для клина $h_y$ и ширина $b_n$; во вторых достаточно ограничиться измерением полной глубины $h_n$ и ширины $b_n$.

В более мелких машинах встречаются полузакрытые пазы одной из форм, представленных на рис. 4; при них применяется обмотка из так называемых „мягких" секций, намотанных проводником круглого сечения, которые вводятся в паз через его отверстие и располагаются в пазу в произвольном порядке. Здесь подлежат измерению размеры паза, дающие возможность установить его площадь с достаточной точностью.

Поэтому такие размеры должны быть определены очень тщательно.

Их измерение может быть произведено одним из следующих двух способов.

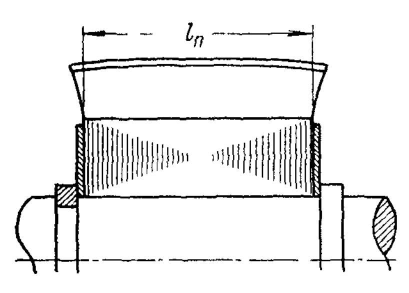



Рис. 2. Веер зубцов якоря

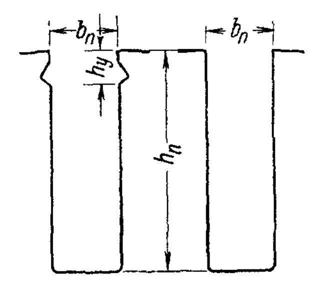



Рис. 3. Формы открытых пазов якоря

а) Посредством штангенциркуля с губками для измерений внутренних размеров, позволяющими определять малые размеры (например, штангенциркуль типа „Колумбус"). Этот способ не отличается точностью, поэтому каждый размер при нем должен быть проверен несколько раз в различных пазах.

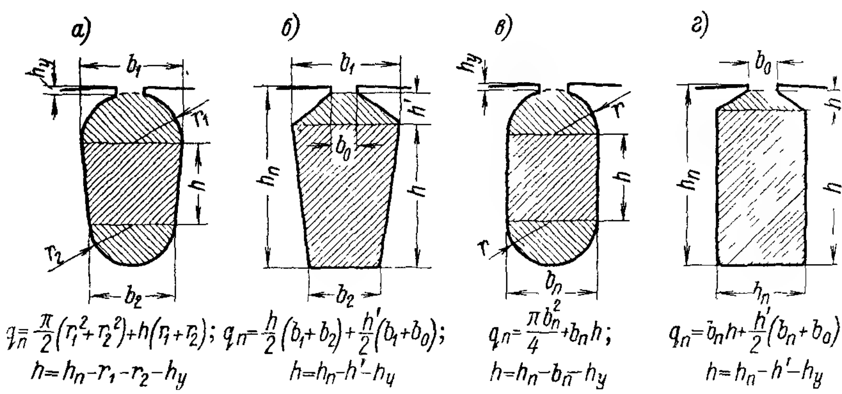



Рис. 4 Формы полузакрытых пазов якоря

б) При помощи клинообразных щупов. Две стальные масштабные линейки по 150 *мм*, с шириной 20 *мм* срезаются наискось так, как показано на рис. 5; получаются два клинообразных щупа, один из которых служит для измерений от 1 до 15 *мм*, а другой—от 10 до 20 *мм*. Каждому миллиметру длины щупа соответствует увеличение ширины на 0,1 *мм*; вставляя эти щупы в различных местах паза до упора в его стенки и замечая, против какого деления приходятся точки

упора, можно с достаточной степенью точности произвести все нужные измерения. Мало вероятно встретить паз шире 20 *мм*; что же касается глубины паза, то ее лучше всего измерять при помощи глубомера штангенциркуля типа „Колум-

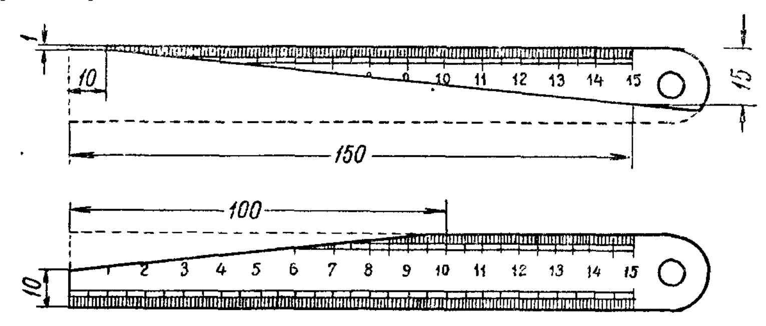



Рис. 5. Клинообразные щупы

бус“ или ему подобного; но можно и для ее измерения применять клинообразные щупы — до 20 *мм* один щуп, выше 20 *мм*—складывая оба щупа вместе, как на рис. 6.

5. Число $n_к$ и ширина $b_к$ поперечных вентиляционных каналов, если они имеются (рис. 7); это измерение ни в каких пояснениях не нуждается.

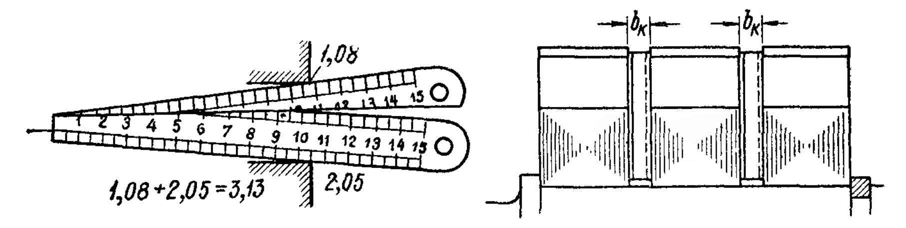



Рис. 6. Измерение при помощи двух клинообразных щупов

Рис. 7. Поперечные вентиляционные каналы

6. Число $n_к$ и диаметр $d_к$ осевых вентиляционных каналов, которые в современных машинах, в особенности быстроходных, встречаются все чаще (рис. 8); это измерение также не представляет никаких затруднений.

7. Внутренний диаметр якоря $D_в$. Если сердечник якоря посажен на втулку, то измерение его внутреннего диаметра следует производить посредством кронциркуля или нутромера; ввиду большого разнообразия конструкций якорных втулок было бы крайне затруднительно дать в этом отношении какие-либо более подробные указания, следует лишь отметить, что иногда это измерение оказывается очень трудным; впрочем, особенно высоких требований к его точности

можно не предъявлять, так как незначительные ошибки в нем существенного влияния на расчет оказать не могут.

Если же сердечник якоря посажен прямо на вал, то за его внутренний диаметр можно принять диаметр вала в месте посадки, измерение которого обычно затруднений не представляет. Иногда внутреннему отверстию сердечника якоря придается форма трилистника или четверолистника, как на рис. 9, с целью создать между ним и валом продольные вентиляционные каналы. При этом за внутренний диаметр сердечника якоря следует принять диаметр окружности, описанной вокруг такого отверстия.

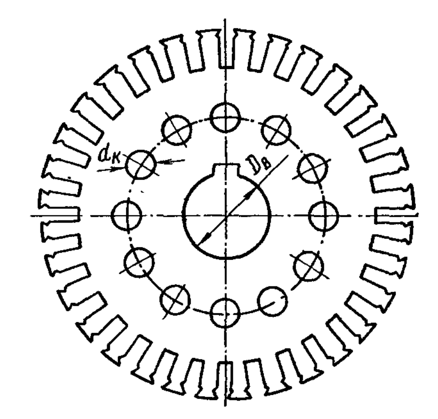


Рис. 8. Продольные вентиляционные каналы

8. Число $n_з$, глубина $h_з$ и осевая длина („ширина") $l_з$ заточек на поверхности якоря под бандажи обмотки, встречающихся главным образом в тех машинах средних мощностей, у которых пазы якоря не имеют клиньев (рис. 10).

Глубина $h_з$ может быть измерена глубомером штангенциркуля, осевая длина — штангенциркулем или масштабной линейкой.

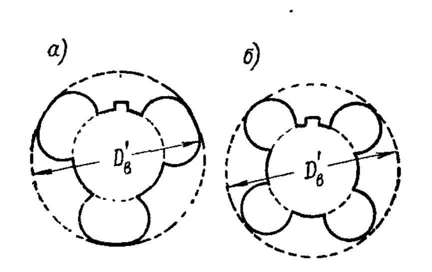


Рис. 9. Фигурные внутренние отверстия якоря

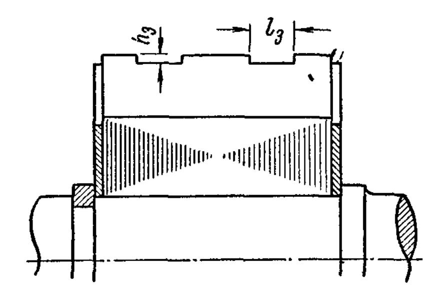


Рис. 10. Заточки для бандажей якоря

9. Толщина листов стали сердечника якоря Δ определяется путем подсчета числа листов на небольшой длине, например на 10—20 *мм*; в подавляющем большинстве случаев $\Delta = 0{,}5$ *мм* и лишь изредка встречается $\Delta = 0{,}35$ *мм.*

10. Род изоляции листов стали сердечника якоря друг от друга можно определить, осторожно отгибая крайние листы в зубцах. В машинах более старого изготовления для

изоляции листов применялась особая тонкая бумага, так называемая „оклеечная“ или „динамная“; в более современных для этой цели применяется покрытие листов с обеих сторон специальным лаком; в мелких машинах часто единственной изоляцией между листами служит тончайшая пленка окалины, образующаяся на листах при их изготовлении.

## Б. Главные полюса

11. Число главных полюсов $2p$, где $p$ есть число пар полюсов, в пояснениях не нуждается.

12. Полюсная дуга главного полюса $b_в$ с достаточной степенью точности измеряется при помощи гибкой масштабной линейки, плотно прикладываемой к рабочей поверхности полюса (рис. 11). Вместо линейки можно применить полоску

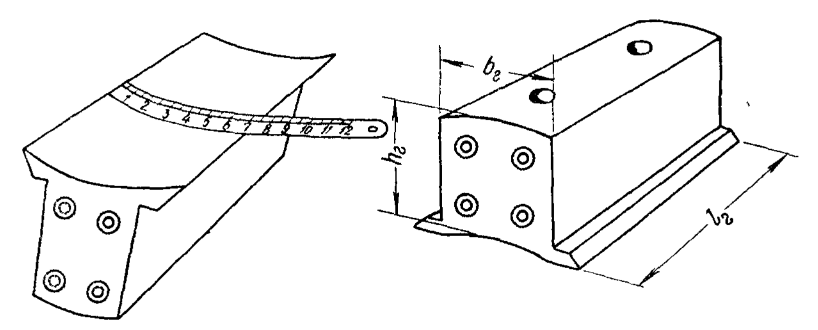



Рис. 11. Измерение полюсной дуги

Рис. 12. Размеры главного полюса

бумаги, на которой делаются оттиски краев полюсного башмака, после чего расстояние между этими оттисками измеряется масштабной линейкой.

13. Осевая длина полюсного башмака главного полюса $l'_г$ является самостоятельным размером только в случае накладных полюсных башмаков, что встречается лишь в машинах очень старой постройки. В современных машинах нормально полюсный башмак главного полюса составляет одно целое с его сердечником и имеет общую с ним длину, обычно равную полной длине якоря $l_п$.

14. Ширина $b_г$, осевая длина $l_г$ и высота $h_г$ сердечника главного полюса (рис. 12) измеряются штангенциркулем или масштабной линейкой.

15. Зазор между главными полюсами и якорем $\delta_г$ (рис. 13). Этот размер нормально измеряется в собранной машине посредством пластинчатых щупов, которые вводятся между серединами полюсных башмаков главных полюсов и сердечником якоря; при этом следует наблюдать за тем, чтобы в точке

измерения находился зубец якоря и чтобы поверхности его и полюсного башмака не были загрязнены и не имели забоин, вмятин, заусениц и т. д.

Измерение следует производить под всеми полюсами с обеих сторон машины и за действительную величину принимать среднее арифметическое из всех измерений.

Зазор может быть определен и в разобранной машине путем точного измерения диаметра внутренней (рабочей) поверхности полюсных башмаков и наружного диаметра якоря; однако этот способ обладает тем недостатком, что не дает представления о степени неравномерности зазоров под отдельными полюсами.

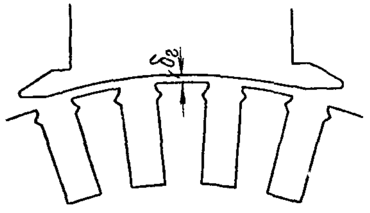


Рис. 13. Зазор под главным полюсом

16. **Толщина листов стали сердечников главных полюсов** $\Delta$ определяется наподобие толщины листов стали сердечника якоря (см. выше). Большею частью $\Delta = 1 \div 1{,}5$ *мм*; иногда в мелких машинах встречаются сердечники полюсов и из более тонких листов — 0,5 *мм* или даже 0,35 *мм* (когда для их изготовления применяются отходы от штамповки листов якоря).

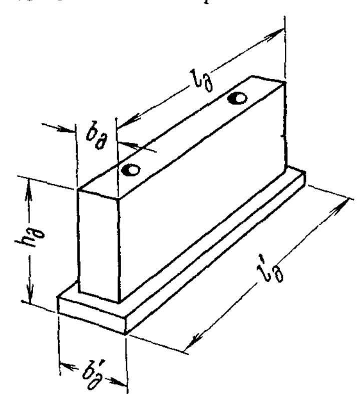


Рис. 14. Размеры добавочного полюса

17. **Материал сердечников главных полюсов** в тех случаях, когда они являются массивными, что встречается в машинах старого изготовления, определяется уже по одному их внешнему виду; если они прилиты к станине, составляя с ней одно целое, то материалом их является чугун; если же они крепятся к станине на болтах, то материалом служит сталь, большею частью кованая.

## В. Добавочные полюса

18. **Число добавочных полюсов** в подавляющем большинстве случаев равно числу главных полюсов, т. е. $2p$; однако в небольших двухполюсных машинах, реже в четырехполюсных, встречается **половинное** число добавочных полюсов, т. е. $p$.

19. **Ширина башмака добавочного полюса** $b'_\partial$, является самостоятельным размером далеко не всегда; нередко добавочные полюса представляют собой просто призматические бруски постоянной длины и ширины.

20. Ширина сердечника $b_д$, осевая длина сердечника $l_д$ и высота сердечника $h_д$ добавочного полюса (рис. 14) измеряются штангенциркулем или масштабной линейкой наравне с предыдущим размером.

21. Зазор между добавочными полюсами и якорем $\delta_д$ определяется подобно зазору между главными полюсами и якорем.

## Г. Станина

22. Внутренний диаметр станины $D_c$ (рис. 15) может быть измерен как штихмассом, так и штангенциркулем или просто масштабной линейкой; в тех случаях, когда

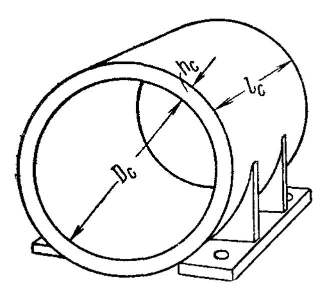


Рис. 15. Размеры станины

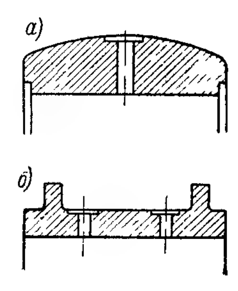


Рис. 16. Фигурные сечения станины

литая станина имеет приливы для обработки поверхностей под полюса, интерес для расчета представляет диаметр только по необработанной части поверхности.

23. Высота сечения станины $h_c$ в случае ее прямоугольного сечения может быть измерена штангенциркулем или масштабной линейкой. В станинах, сваренных из листовой стали и обработанных только по внутренней поверхности, может иметь место значительная разностенность, поэтому высоту сечения следует измерять в нескольких местах.

24. Осевая длина станины $l_c$ определяется штангенциркулем или масштабной линейкой.

В станинах, имеющих непрямоугольную форму сечения, как, например, на рис. 16, следует снять такие размеры, которые позволили бы подсчитать площадь поперечного сечения станины.

25. Материал станины (чугун, стальное литье, прокатная сталь) определяется по ее внешнему виду.

## Д. Коллектор

26. Диаметр коллектора $D_к$ является не вполне определенным размером, так как в машине, долгое время находившейся в эксплуатации, коллектор имеет износ, неравномер-

ный по его длине; при перемотке машины такой коллектор подлежит обточке, которая должна быть произведена лишь настолько, чтобы удалить неровности. Поэтому за диаметр коллектора следует принять величину, примерно на 0,1 *мм* меньшую, чем диаметр, измеренный при помощи штангенциркуля или кронциркуля в наиболее изношенном месте.

27. Осевая длина коллектора $l_к$, или, правильнее сказать, длина его рабочей части, на которой могут располагаться щетки (рис. 17), измеряется при помощи штангенциркуля или масштабной линейки.

28. Число пластин коллектора $K$ определяется счетом.

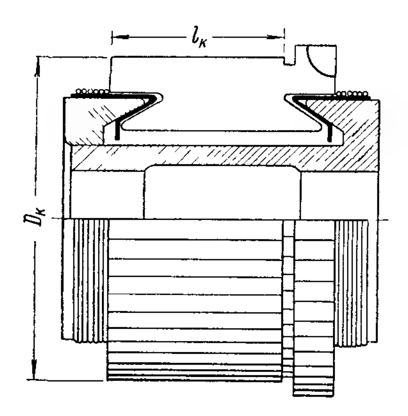


Рис. 17. Размеры коллектора

## 3. ОБРАБОТКА ОБМЕРА

Первой операцией по расчету машины является обработка результатов ее обмера. В дальнейшем всюду принято все линейные размеры выражать в сантиметрах и все площади—в квадратных сантиметрах; исключение из этого составляют только размеры поперечных сечений проводников и связанные с ними размеры пазов якоря, которые выражаются в миллиметрах, а соответствующие площади—в квадратных миллиметрах.

Поэтому прежде всего следует перевести из миллиметров в сантиметры все размеры, полученные при обмере, кроме размеров пазов якоря, которые остаются в миллиметрах.

1. Расчетная длина якоря $l$ берется как разность между полной длиной $l_п$ и половиной суммы ширин всех поперечных вентиляционных каналов:

$$l = l_п - \frac{1}{2} n_к b_к \ [см]. \tag{1}$$

Если же поперечных вентиляционных каналов нет, то расчетная длина принимается прямо равной полной длине:

$$l = l_п \ [см]. \tag{1a}$$

2. Чистая длина стали сердечника якоря $l_0$ получается из полной длины $l_п$ путем вычитания суммы ширин всех поперечных вентиляционных каналов и умножения остатка на некоторый коэффициент $k_0$, учитывающий неплотность

прилегания листов стали друг к другу и наличие изоляции между ними:

$$l_0 = k_0 (l_n - n_\kappa b_\kappa) \ [см]. \qquad (2)$$

Если же поперечные вентиляционные каналы отсутствуют, то чистая длина стали берется как произведение коэффициента $k_0$ на полную длину:

$$l_0 = k_0 l_n \ [см]. \qquad (2а)$$

Значения коэффициента $k_0$ зависят от толщины листов сердечника якоря $\Delta$ и от способа их изоляции друг от друга и могут быть взяты из табл. 1.

*Таблица 1*

| Толщина листов $\Delta$ [*мм*] | Изоляция листов | | |
|---|---|---|---|
| | Бумага | Лак | Без изоляции |
| 0,5 | 0,90 | 0,93 | 0,95 |
| 0,35 | 0,87 | 0,90 | 0,93 |

Пример 1. Полная длина сердечника якоря $l_n = 19,0$ *см*; толщина листов $\Delta=0,5$ *мм*; изоляция листов — лак; якорь имеет поперечные вентиляционные каналы числом $n_\kappa=3$ и шириной $b_\kappa=1,0$ *см*. Определить его расчетную длину $l$ и чистую длину стали $l_0$.

Согласно формуле (1), расчетная длина

$$l = l_n - \frac{1}{2} n_\kappa b_\kappa = 19 - \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 1 = 17,5 \ \textbf{см}.$$

В соответствии с указанной толщиной листов и родом их изоляции по табл. 1 находится коэффициент

$$k_0 = 0,93.$$

Чистая длина стали по формуле (2)

$$l_0 = k_0 (l_n - n_\kappa b_\kappa) = 0,93 (19 - 3 \cdot 1) = 14,9 \ \textbf{см}.$$

Если бы вентиляционных каналов не было, расчетную длину следовало бы принять

$$l = l_n = 19,0 \ \textbf{см}$$

и чистую длину стали

$$l_0 = k_0 l_n = 0,93 \cdot 19 = 17,65 \ \textbf{см}.$$

3. Зубцовые деления якоря $t_1$ и $t_2$ представляют собой длины частей окружности, приходящихся на один зубец и один паз якоря; на поверхности якоря

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} \ [см], \qquad (3)$$

где $D$ наружный диаметр якоря в *см* и

$Z$ число зубцов или пазов на его окружности;

у дна пазов

$$t_2 = \frac{\pi(D - 2h_n)}{Z} \ [см], \tag{4}$$

где $h_n$ — глубина паза в *см*.

4. Расчетная ширина зубца якоря $b_з$.

Следует различать два случая:

а) Прямоугольные пазы (рис. 18). Ширина зубца непостоянна по его высоте; наибольшую величину $b'_з$ она имеет у наружной поверхности якоря и наименьшую $b''_з$ —у корня зубца.

Наибольшая ширина зубца $b'_з$ может быть получена или непосредственным обмером, или путем вычитания измеренной ширины паза $b_n$ из зубцового деления $t_1$:

$$b'_з = t_1 - b_n \ [см]. \tag{5}$$

Рис. 18. Размеры зубцов якоря

Наименьшая ширина зубца $b''_з$ обычно труднее поддается непосредственному измерению; поэтому ее приходится получать вычитанием ширины паза из величины зубцового деления по дну пазов:

$$b''_з = t_2 - b_n \ [см]. \tag{5a}$$

За расчетную ширину зубца $b_з$ принимается его ширина на расстоянии одной трети высоты зубца $h_n$ от его корня; она равна:

$$b_з = b''_з + \frac{b'_з - b''_з}{3} \ [см]. \tag{6}$$

б) Трапецевидные или овальные пазы. Ширина зубца обычно остается неизменной на большей части высоты и легче поддается непосредственному измерению, нежели расчету, что и следует учесть при обмере.

Пример 2. Якорь при диаметре $D$=49,0 *см* имеет число пазов $Z$=63. Форма паза прямоугольная, ширина паза $b_n$=10,7 *мм* и глубина его $h_n$=40 *мм*.

Определить расчетную ширину зубца $b_з$.

Зубцовые деления якоря по формулам (3) и (4)

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{3{,}14 \cdot 49}{63} = 2{,}44 \ см;$$

$$t_2 = \frac{\pi (D - 2h_n)}{Z} = \frac{3,14\,(49 - 2\cdot 4)}{63} = 2,04 \text{ см.}$$

Наибольшая ширина зубца (у поверхности якоря) согласно формуле (5)

$$b_з' = t_1 - b_n = 2,44 - 1,07 = 1,37 \text{ см.}$$

Наименьшая ширина зубца (у корня) по формуле (5а)

$$b_з'' = t_2 - b_n = 2,04 - 1,07 = 0,97 \text{ см.}$$

Отсюда искомая расчетная ширина зубца по формуле (6)

$$b_з = b_з'' + \frac{b_з' - b_з''}{3} = 0,97 + \frac{1,37 - 0,97}{3} = \mathbf{1,1} \textbf{ см.}$$

5. Расчетная высота тела якоря $h_m$ вычисляется как половина разности между наружным диаметром якоря $D$, внутренним его диаметром $D_в$ и удвоенной глубиной паза $h_n$:

$$h_m = \frac{1}{2}(D - D_в - 2h_n) \ [см]. \qquad (7)$$

Если якорь имеет осевые вентиляционные каналы с диаметром $d_к$, расположенные в один ряд, то отсюда следует еще отнять две трети этого диаметра:

$$h_m = \frac{1}{2}(D - D_в - 2h_n) - \frac{2}{3} d_к \ [см]. \qquad (7а)$$

Пример 3. Внутренний диаметр якоря из предыдущего примера равен диаметру его вала $D_в = 14,0$ *см*; требуется определить расчетную высоту его тела, если в нем имеется ряд продольных вентиляционных каналов с диаметром $d_к = 3,0$ *см*.

Согласно формуле (7а), искомая расчетная высота тела якоря

$$h_m = \frac{1}{2}(D - D_в - 2h_n) - \frac{2}{3} d_к = \frac{1}{2}(49 - 14 - 2\cdot 4) - \frac{2}{3}\cdot 3 = \mathbf{11,5} \textbf{ см.}$$

Если бы продольных каналов не было, высота тела якоря была бы

$$h_m = \frac{1}{2}(D - D_в - 2h_n) = \frac{1}{2}(49 - 14 - 2\cdot 4) = \mathbf{13,5} \textbf{ см.}$$

6. Площадь сечения паза якоря $q_n$ определяется только в том случае, когда предполагается снабдить якорь обмоткой из мягких проволочных секций; это всегда имеет место при полузакрытых пазах трапецевидной или овальной формы, а иногда и при пазах прямоугольной формы.

Вычисление площади сечения паза производится по одной из формул, выписанных на рис. 4 для пазов различной формы; для вычисления площадь паза сложной формы разбивается на ряд простых геометрических фигур, производится вычисление площади каждой из них и затем суммирование полученных результатов.

Следует еще раз напомнить, что в отличие от прочих площадей площадь паза выражается в квадратных миллиметрах.

Пример 4. Полузакрытый паз якоря овальной формы имеет размеры, указанные на рис. 19.

Требуется определить площадь сечения паза $q_n$.

Площадь сечения данного паза может быть разбита для вычисления на следующие простые фигуры (см. рис. 4, *а*):

а) половина круга с радиусом

$$r_1 = \frac{1}{2} \cdot 10{,}6 = 5{,}3 \ \text{мм};$$

б) половина круга с радиусом

$$r_2 = \frac{1}{2} \cdot 6{,}5 = 3{,}25 \ \text{мм};$$

в) трапеция с верхним основанием $b_1$, нижним основанием $b_2$ и высотой $h$; последняя может быть определена путем вычитания из полной глубины паза $h_n$ радиусов $r_1$ и $r_2$ и высоты усиков у отверстия паза $h_y$:

$$h = h_n - r_1 - r_2 - h_y = 26{,}2 - 5{,}3 - 3{,}25 - 0{,}8 = 16{,}85 \ \text{мм}.$$

Отсюда искомая площадь паза

$$q_n = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + \frac{h}{2}\left(b_1 + b_2\right) = \frac{3{,}14}{2}(5{,}3^2 + 3{,}25^2) +$$

$$+ \frac{16{,}85}{2}(10{,}6 + 6{,}5) = \mathbf{204{,}7} \ \textbf{мм}^2.$$



Рис. 19. Эскиз паза к примеру 4

7. Площадь поперечного сечения воздушного зазора (или просто „площадь зазора") $Q_в$ берется как произведение полюсной дуги $b_в$ на расчетную длину $l$:

$$Q_в = b_в l \ [см^2]. \qquad (8)$$

8. Расчетное сечение зубцов якоря $Q_з$ получается перемножением расчетной ширины зубца $b_з$ на чистую длину стали $l_0$ и на число зубцов, приходящихся на полюсную дугу $b_в$, которое берется как отношение последней к зубцовому делению $t_1$:

$$Q_з = \frac{b_з l_0 b_в}{t_1} \ [см^2]. \qquad (9)$$

9. Площадь поперечного сечения тела якоря $Q_m$ вычисляется как произведение чистой длины стали $l_0$ на высоту тела якоря $h_m$:

$$Q_m = l_0 h_m \ [см^2]. \qquad (10)$$

Пример 5. Полюсная дуга главного полюса $b_в$ = 15,1 *см*.

Требуется определить площадь поперечного сечения воздушного зазора $Q_в$, расчетное сечение зубцов якоря $Q_з$ и сечение тела якоря $Q_m$, если его размеры соответствуют примерам 1 и 2.

Площадь зазора вычисляется по формуле (8):

$$Q_в = b_в l = 15{,}1 \cdot 17{,}5 = 264 \text{ см}^2.$$

Если бы поперечных вентиляционных каналов не было, площадь зазора вычислялась бы по этой же формуле, но с подстановкой другого значения расчетной длины:

$$Q_в = 15{,}1 \cdot 19{,}0 = 287 \text{ см}^2.$$

Сечение зубцов в обоих случаях вычисляется по формуле (9) с подстановкой соответствующих значений расчетной длины:

а) при наличии каналов

$$Q_з = \frac{b_з l_0 b_в}{t_1} = \frac{1{,}1 \cdot 14{,}9 \cdot 15{,}1}{2{,}44} = 101{,}3 \text{ см}^2;$$

б) при отсутствии каналов

$$Q_з = \frac{1{,}1 \cdot 17{,}65 \cdot 15{,}1}{2{,}44} = 120{,}0 \text{ см}^2.$$

Сечение тела якоря в обоих случаях вычисляется по формуле (10) с подстановкой соответствующих значений как расчетной длины, так и высоты тела якоря:

а) при наличии поперечных каналов

$$Q_m = l_0 h_m = 14{,}9 \cdot 13{,}5 = 201 \text{ см}^2;$$

б) при наличии продольных каналов

$$Q_m = 17{,}65 \cdot 11{,}5 = 203 \text{ см}^2.$$

10. Площадь поперечного сечения сердечника главного полюса $Q_г$ определяется перемножением ширины сердечника $b_г$ на его осевую длину $l_г$ и на коэффициент заполнения стали $k_0$:

$$Q_г = k_0 b_г l_г \ [\text{см}^2]. \qquad (11)$$

Значение коэффициента $k_0$ может быть принято для стали толщиной $\Delta = 1$ *мм* равным $k_0 = 0{,}95$, а для стали толщиной $\Delta = 1{,}5$ *мм* равным $k_0 = 0{,}97$.

11. Площадь поперечного сечения станины $Q_c$ при прямоугольной форме берется как произведение его осевой длины $l_c$ на высоту сечения $h_c$:

$$Q_c = l_c h_c \ [\text{см}^2]. \qquad (12)$$

Если же оно имеет более сложную форму, его следует разбить на ряд простых геометрических фигур, вычислить площадь каждой из них в отдельности и просуммировать результаты.

Пример 6. Ширина сердечника главного полюса $b_г = 12{,}0$ *см* и его осевая длина $l_г = 19{,}0$ *см*; полюс собран из листов толщиной $\Delta = 1{,}0$ **мм**. Поперечное сечение станины имеет форму и размеры, представленные на рис. 20.

Требуется определить площади поперечных сечений сердечника главного полюса $Q_г$ и станины $Q_c$.

Сечение сердечника главного полюса определяется по формуле (11), в которой для коэффициента заполнения стали в соответствии с указанной толщиной листов следует принять $k_0 = 0{,}95$.

$$Q_г = k_0 b_г l_г = 0{,}95 \cdot 12 \cdot 19 = 217 \text{ см}^2.$$

Рис. 20. Эскиз сечения станины к примеру 6

Площадь сечения станины для вычисления можно разбить на следующие части:

а) прямоугольник с основанием 300 *мм* = 30 *см* и высотой 35 *мм* = 3,5 *см*;

б) две трапеции с нижним основанием 35 *мм* = 3,5 *см*, верхним основанием 25 *мм* = 2,5 *см* и высотой 25 *мм* = 2,5 *см*.

Тогда искомая площадь сечения станины будет:

$$Q_c = 30 \cdot 3{,}5 + 2 \cdot 2{,}5 \frac{3{,}5 + 2{,}5}{2} = 120 \text{ см}^2.$$

12. Расчетная толщина слоя зубцов якоря $L_з$ в случае прямоугольных открытых пазов равна удвоенной глубине паза:

$$L_з = 2h_п \ [см]. \tag{13}$$

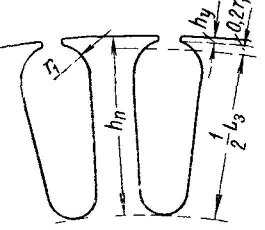


Рис. 21. Расчетная толщина слоя зубцов

В случае же полузакрытых пазов овальной формы от глубины паза отнимается 0,2 радиуса закругления паза (рис. 21):

$$L_з = 2\,(h_п - 0{,}2r_1) \ [см]. \tag{13а}$$

Пример 7. Требуется определить расчетную толщину слоя зубцов якоря из примера 4. Так как паз данного якоря имеет овальную форму, вычисление расчетной толщины слоя зубцов надо вести по формуле (13а):

$$L_з = 2 \cdot (h_п - 0{,}2r_1) = 2 \cdot (26{,}2 - 0{,}2 \cdot 5{,}3) = 50{,}3 \text{ мм} = 5{,}03 \text{ см}.$$

13. Длина магнитного пути в теле якоря $L_m$ берется как сумма длины дуги части окружности среднего волокна, приходящейся на один полюс, и высоты тела якоря. Диаметр этой окружности равен наружному диаметру якоря $D$, из которого вычтены удвоенная глубина паза $h_п$ и высота тела якоря $h_m$:

$$L_m = \frac{\pi (D - 2h_п - h_m)}{2p} + h_m \ [см]. \tag{14}$$

14. Длина среднего волокна станины $L_c$ берется как длина дуги части окружности, приходящейся на один полюс, диаметр которой равен сумме внутреннего диаметра станины $D_c$ и высоты ее поперечного сечения $h_c$:

$$L_c = \frac{\pi (D_c + h_c)}{2p} \ [см]. \tag{15}$$

Пример 8. Требуется определить длину магнитного пути в теле якоря $L_m$ по данным примера 3 и длину среднего волокна станины $L_c$ по данным примера 6, если внутренний диаметр станины $D_c = 76{,}0$ *см* и машина шестиполюсная: $2p = 6$.

Длина среднего волокна тела якоря определяется по формуле (14):

$$L_m = \frac{\pi (D - 2h_n - h_m)}{2p} + h_m = \frac{3{,}14\,(49 - 2 \cdot 4 - 11{,}5)}{6} + 11{,}5 = \mathbf{27\ см.}$$

С достаточной для практических целей точностью можно определить длину среднего волокна станины по формуле (15), пренебрегая наличием трапецевидных площадок ее сечения и положив высоту сечения $h_c$=3 *см*:

$$L_c = \frac{\pi (D_c + h_c)}{2p} = \frac{3{,}14\,(76 + 3)}{6} = \mathbf{41{,}4\ см.}$$

## 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ И ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В машинах постоянного тока применяются исключительно медные проводники круглого и прямоугольного сечения, причем последние как изолированные, так и голые.

В зависимости от состава изоляции, изолированные проводники различаются по маркам, имеющим общепринятые условные обозначения.

В приложениях I и II даны таблицы нормальных размеров проводников круглого и прямоугольного сечения, состав изоляции различных марок с их условными обозначениями и толщины изоляции в зависимости от размеров сечений.

Проводник прямоугольного сечения для обмоток машин постоянного тока применяется главным образом марки ПБД, иногда ПДА; однако часто находит применение и голая прямоугольная медь, которая изолируется при изготовлении обмотки. При круглом сечении наиболее часто применяется марка ПЭБО, реже ПБД; в последнее время в небольших машинах нередко применяется проводник марки ПЭЛ; в очень маленьких машинах мощностью всего лишь в несколько ватт встречается также проводник марки ПЭШО, реже ПШД.

Изоляционные материалы, находящие применение в машинах постоянного тока, многочисленны и разнообразны; их можно классифицировать по различным признакам: по степени гибкости, по форме, по происхождению и т. д.

# I. ГИБКИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## А. Листовые материалы

1. Бумага телефонная — плотная бумага серо-коричневого цвета из древесной массы: натуральная, толщиной 0,06 *мм*, или лакированная, главным образом бакелитовым лаком, толщиной 0,07 *мм*; вес 1 *м*² натуральной бумаги — 45 *г*, лакированной — 65 *г*. Применяется для изолировки пазовых частей якорных секций и сердечников главных и добавочных полюсов.

2. Бумага кабельная подобна бумаге телефонной, но примерно вдвое толще; натуральная имеет толщину 0,12 *мм* и вес 1 *м*²—100 *г*, а лакированная соответственно 0,13 *мм* и 110 *г*. Применение то же самое.

3. Бумага длинноволокнистая („японская") — тонкая бумага из растительных волокон, которые благодаря особому способу приготовления направлены примерно параллельно; толщина 0,025 *мм*, вес 1 *м*² — 15 *г*. Обладает очень высокой прочностью по направлению волокон, но весьма низкой — поперек их.

Применяется для клейки миканита (см. ниже); нарезанная на полосы вдоль волокон может применяться для изоляции отдельных проводников.

4. Бумага оклеечная („динамная") — тонкая бумага из растительных волокон, сильно проклеенная; с одной стороны имеет глянцевитую поверхность, с другой — матовую. Толщина 0,03 *мм*, вес 1 *м*² — 20 *г*.

Применяется взамен предыдущей, но уступает ей в прочности. Употребление ее по прямому назначению — для оклейки листов электротехнической стали — в настоящее время почти совершенно прекращено.

5. Картон электроизоляционный („прессшпан") — картон из древесных волокон, от светлого серовато-желтого до оранжево-коричневого цвета, толщиной от 0,1 до 5 *мм*, удельный вес 1,15—1,25.

Находит чрезвычайно широкое применение; при небольших толщинах — для изоляции пазовых частей секций, выстилания внутренней поверхности пазов, изоляции сердечников главных и добавочных полюсов, как междувитковая изоляция при применении голой меди и т. д.; при более значительных толщинах — для всякого рода прокладок, изолирующих шайб главных и добавочных полюсов, всевозможных распорок и т. п.

Особая разновидность — лощеный электроизоляционный картон с глянцевой поверхностью, толщиной 0,1—0,15 *мм*, применяется специально для проходных коробок пазовой изоляции якорей с полузакрытыми пазами в целях облегчения

вкладывания сторон мягких проволочных секций через отверстие паза.

6. Картон электроизоляционный повышенного качества — картон из растительных волокон, подвергнутых особой обработке, обычно от серого до темносерого цвета, встречается под различными названиями („антивольтон", „ледер-папка" и т. д.). Удельный вес около 1,3. В зависимости от изготовления имеет либо матовую шероховатую, либо гладкую глянцевитую поверхность. Отличается очень высокой механической прочностью, но в натуральном виде гигроскопичен. Может применяться наравне с электроизоляционным картоном, но ввиду значительной дороговизны следует избегать его применения там, где не требуется особой механической прочности.

7. Фибра тонколистовая серая („летероид") — картон из хлопка, обработанного хлористым цинком, толщина 0,1—2,0 *мм*, удельный вес 1,25—1,30. Благодаря очень высоким механическим качествам применяется для изоляции пазовых частей, в особенности для покрытия гильз из микафолия с целью защиты от повреждений при укладке, однако его широкому применению препятствует весьма значительная дороговизна.

8. Бумага асбестовая — бумага из асбестового волокна с небольшим добавлением волокон растительного происхождения, толщиной от 0,2 до 0,5 *мм*, удельный вес 0,6. Отличается невысокой механической прочностью, но весьма теплостойка и потому применяется для изоляции витков однорядных обмоток главных полюсов очень крупных машин и добавочных полюсов из голой меди, гнутой на высокое ребро, для чего подклеивается к виткам с одной стороны теплостойкими лаками; в таком виде свободно выдерживает весьма значительные давления при опрессовке катушек.

## Б. Ткани

1. Ткани хлопчатобумажные: в зависимости от толщины, выделки и плотности носят различные названия — перкаль, миткаль, тафта, вольта, батист, шифон. Применяются главным образом пропитанные лаками, и в этом случае носят название „лакотканей". В зависимости от сорта пропиточного лака различаются: желтая лакоткань („эксцельсиор") при масляном лаке и черная лакоткань („кембрик") при битумно-масляном лаке. Находят широкое применение для изоляции обмоток всех видов. Обладают отличными изолирующими свойствами, не гигроскопичны, но имеют невысокую механическую прочность; в частности, легко прорезываются и продавливаются всякого рода неровностями металлических предметов, например острыми гранями зубцов якоря или сердечников полюсов.

2. Ткани льняные; также носят различные названия в зависимости от сорта: парусина, холст, брезент и т. д. Значительно толще, но и много прочнее хлопчатобумажных тканей. Применяются как в натуральном виде, так и в пропитанном лаками, для второстепенных целей: для изоляции сердечников главных и добавочных полюсов, обмоткодержателей и т. п.

3. Ткани шелковые применяются исключительно в виде лакотканей в очень мелких машинах, где при небольшой толщине необходимо иметь достаточно хорошую изоляцию; стоимость их значительно выше, чем хлопчатобумажных.

4. Чехлы („чулки") хлопчатобумажные и шелковые как натуральные, так и пропитанные масляным лаком, применяются в небольших машинах для изоляции различных соединений, в том числе подводов проволочных мягких секций к коллектору. Нередко окрашиваются в различные яркие цвета, например для распознавания начал и концов секций.

5. Лакированная лента (лаколента) представляет собой либо лакоткань, нарезанную на полосы по диагонали плетения, либо специальную ленту, пропитанную масляным лаком, шириной от 10 до 40 *мм*. Находит широкое применение для изоляции пазовых и лобовых частей якорных секций, катушек главных и добавочных полюсов, всякого рода соединений и т. п.

6. Лента хлопчатобумажная различается по толщине и способу тканья; выпускается шириной от 10 до 40 *мм*.

Лента батистовая имеет толщину 0,12 *мм*; применяется главным образом для изоляции отдельных витков якорных секций в пазовой и лобовой части.

Лента миткалевая, толщиной 0,15 *мм*, употребляется для тех же целей, а также для изоляции катушек полюсов небольших машин.

Лента тафтяная, толщиной 0,18 *мм*, используется наравне с предыдущей в несколько более крупных машинах.

Лента киперная, диагонального плетения, толщина которой достигает 0,3 *мм*, применяется для наиболее грубых покровных слоев изоляции, как, например, для катушек главных полюсов крупных машин; является очень прочным материалом.

7. Лента стеклянная („стеклолента") представляет собой плетение из чистой стеклянной пряжи; механическая и электрическая прочность ее и теплостойкость очень высоки; толщина обычно составляет 0,1—0,15 *мм*. С успехом применяется вместо лаколенты для изоляции якорных секций, однако при непременном условии пропитки теплостойкими лаками, причем существенно важно, чтобы лак хорошо сцеплялся со стеклянным волокном, так как в противном случае стеклянная пряжа с течением времени расползается.

## В. Гибкие изделия из слюды

1. Миканит гибкий — шипаная слюда, клеенная лаком в листы толщиной от 0,15 до 0,5 *мм*; при температуре 100—150° С размягчается и приобретает достаточную гибкость. Удельный вес 1,9.

Применяется для изоляции сердечников полюсов, обмоткодержателей и бандажей якоря.

2. Микафолий („микалист") — щипаная слюда, клеенная лаком на основу из бумаги в один, два и три слоя. Толщина от 0,12 до 0,25 *мм* и выше, удельный вес 1,4.

Применяется для изоляции якорных секций в пазовой части, прокладок между витками секций и полюсных катушек, намотанных из голой меди, гнутой на низкое ребро.

3. Микалента — щипаная слюда, клеенная лаком в один слой на основу из длинноволокнистой бумаги; толщина нормально 0,13—0,17 *мм*, удельный вес 1,5—1,6.

Применяется для изоляции якорных секций в пазовой и лобовой частях.

## Г. Органические пленки

1. Ацетил-целлюлоза — прозрачная бесцветная пленка из древесной клетчатки, подвергнутой особой обработке; напоминает целлулоид, но отличается от него тем, что очень плохо горит; является одним из наиболее теплопроводных изоляционных материалов. Удельный вес 1,2—1,25.

Применяется в виде ленты для изоляции пазовых и лобовых частей якорных секций.

2. Трихлорацетат — прозрачная пленка от светлоголубого до темносинего цвета, представляющая собой дальнейшее усовершенствование ацетил-целлюлозы в направлении повышения механической и электрической прочности.

Применение то же.

Общим свойством всех синтетических пленок является то, что надорвать их от чисто обрезанного края или прорвать в середине очень трудно; но будучи надорваны, они дальше рвутся без всякого труда. Это обстоятельство вынуждает защищать изоляцию из пленок покровными слоями механически прочных материалов, что сильно препятствует их применению.

# II. ТВЕРДЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## А. Твердые материалы органического происхождения

1. Дерево различных пород находит широкое применение для всякого рода распорок, прокладок и клиньев. Особенно пригоден белый бук, так как он достаточно прочен, не склонен колоться и легко обрабатывается. Для того чтобы изделия из дерева не усыхали, они должны тщательно просу-

шиваться и пропитываться в льняном масле. В виде фанеры разной толщины дерево применяется для прокладок между витками обмоток добавочных полюсов, изготовленных из голой меди, гнутой на высокое ребро, и для полюсных шайб главных и добавочных полюсов.

2. Гэтинакс представляет собой бумагу, лакированную бакелитовым лаком и спрессованную под значительным давлением при температуре запекания лака. Выпускается в виде пластин различной толщины — от 0,5 *мм* до 60 *мм*. Удельный вес 1,3—1,4. Прекрасно принимает всевозможную механическую обработку, прочен, не гигроскопичен и не горюч, но способен колоться вдоль слоев бумаги. Обладает очень хорошими изолирующими качествами, в особенности если после механической обработки отлакирован бакелитовым лаком и запечен.

Превосходный материал для клиньев, закрывающих пазы якоря, всевозможных распорок, досок зажимов и разного рода шайб, в том числе полюсных. По сравнению с деревом обладает тем преимуществом, что не усыхает.

3. Текстолит отличается от гэтинакса тем, что спрессован не из бумаги, а из хлопчатобумажной или льняной ткани. Удельный вес 1,3—1,35. Прочностью превосходит гэтинакс и обладает меньшей склонностью колоться вдоль слоев. При механической обработке дает ворсистую поверхность, поэтому нуждается в последующей шлифовке. В остальном подобен гэтинаксу и имеет ту же область применения, но стоит значительно дороже.

4. Фибра представляет собой сильно спрессованную клетчатку, обработанную хлористым цинком; выпускается в виде досок, листов разной толщины, стержней и т. д. Удельный вес 1,25, цвет обычно коричнево-красный, реже серый или желтовато-серый. Теплостойкость, изолирующие свойства, обрабатываемость и механическая прочность хороши, но значительная гигроскопичность и сильное коробление при отсыревании являются ее крупными недостатками.

Применяется для изготовления клиньев, распорок разного рода, досок зажимов, различных втулок и шайб.

5. Эбонит (вулканизированный каучук) выпускается в виде листов, досок, стержней и т. д. Удельный вес 1,15—1,3, цвет черный или темнокоричневый. При нагревании сначала размягчается, затем плавится, но горит плохо; очень хорошо принимает всякую механическую обработку, в том числе полировку, но механическая прочность низкая. Может применяться в тех местах, где не ожидаются значительные нагревы. В частности употребляется для опрессовки пальцев щеткодержательной траверзы и для досок зажимов.

6. Пластические массы в настоящее время получили чрезвычайно широкое развитие и крайне разнообразны по своим физическим и механическим свойствам.

В машинах постоянного тока пластмассы находят применение для опрессовок пальцев щеткодержательной траверзы, прессованных досок зажимов, разного рода распорок. Заслуживает упоминания использование пластмасс для опрессовки коллекторов небольших машин без коллекторных манжет и миканитовых прокладок между пластинами.

### Б. Твердые материалы неорганического происхождения

1. Асбоцемент — масса из асбестового волокна, связанного цементом, светлосерого цвета. Удельный вес 1,6. Выпускается в виде досок разной толщины, а также фасонных деталей. Может быть допущен для изготовления досок зажимов и различных распорок, но для этой цели должен быть пропитан в асфальтовом лаке.

2. Натуральные камни — мрамор, шифер и т. д. — могут быть применены только для досок зажимов.

3. Миканит твердый — щипаная слюда, клеенная с небольшим количеством лака. Мало размягчается при нагревании; удельный вес 2,0.

Применяется почти исключительно для изоляции коллекторов в виде манжет и прокладок между пластинами. В последнем случае должен иметь строго калиброванную толщину.

## 5. ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ

По своему устройству обмотки якорей машин постоянного тока принадлежат к типу двухслойных обмоток и внешне имеют сходство с двухслойными обмотками статоров машин переменного тока или с обмотками фазовых роторов асинхронных двигателей с контактными кольцами.

Часть обмотки якоря, заключенная между двумя пластинами коллектора, носит название „секции“ обмотки; заметим сразу, что такие пластины далеко не всегда находятся в коллекторе рядом.

Часть обмотки, состоящая из одной или нескольких секций, стороны которых укладываются в одни и те же пазы и обычно снабжаются общей изоляцией от сердечника якоря, носит название „катушки“. Нельзя не отметить относительность этого названия; так, в ряде обмоток отдельные секции, входящие в состав одной и той же „катушки“, не соединяются между собой непосредственно.

Укладка секций в пазы якоря производится так, что в нижнем слое—на дне каждого паза—находятся стороны одних секций, а в верхнем слое—непосредственно под клином, закрывающим паз,—стороны других секций.

Исключение составляют только самые мелкие машины мощностью всего лишь в несколько ватт и машины очень низкого

напряжения—в несколько вольт, которые иногда снабжаются однослойными обмотками; тогда каждый паз содержит только одну сторону одной секции.

Каждая секция может состоять либо из одного витка, либо из нескольких; в последнем случае, если количество витков велико, они выполняются проводником круглого сечения. Если еще при этом пазы якоря полузакрытые, то стороны секций вкладываются в паз через его отверстие не сразу, а по отдельным виткам, и располагаются внутри паза в произвольном порядке.

Такие секции носят название „мягких" или „всыпных"; они заготавливаются на шаблоне, имеющем форму трапеции с закругленными углами, и их лобовые части окончательно формуются уже после укладки обмотки в пазы. На рис. 22 показан пример катушки, состоящей из трех мягких секций.

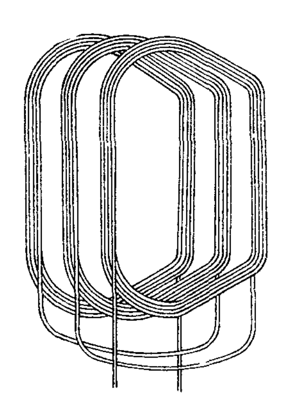


Рис. 22. Катушка из мягких секций

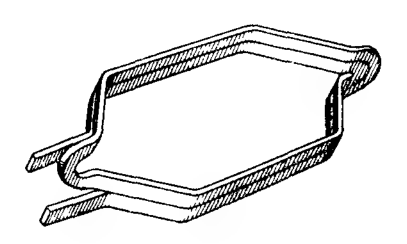


Рис. 23. Двухвитковая жесткая секция

Если же количество витков в секции невелико, то применяется проводник прямоугольного сечения, которое располагается в пазу всегда большей стороной по высоте, в отличие от секций статоров машин переменного тока. При этом секциям придается почти совершенно окончательная форма еще до укладки в пазы, и они носят название „жестких" секций. На рис. 23 дан пример двухвитковой жесткой секции.

Обмотка из жестких секций характерна для якорей с открытыми пазами; однако иногда жесткие секции применяются и при полузакрытых пазах прямоугольной формы. При этом приходится производить вкладывание обмотки в пазы сбоку, наподобие того, как это делается в фазовых роторах асинхронных двигателей. С этой целью приходится выполнять каждую секцию из двух полусекций, имеющих только по одной заранее отформованной лобовой части; вторая же формуется только после укладки, на самом якоре, после чего полусекции соединяются между собой хомутиками на пайке. На рис. 24 дан пример подобной полусекции.

Существуют два основных типа обмоток якорей машин постоянного тока: „петлевая“, или „параллельная“ обмотка, и „волновая“, или „последовательная“; все остальные типы обмоток являются производными от этих двух.

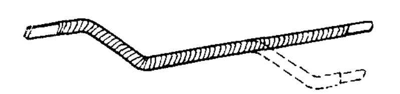


Рис. 24. Полусекция для полузакрытых пазов

Поскольку стороны секций обычно расположены в каждом пазу попарно друг над другом, счет сторон секций можно вести по какому-нибудь одному слою, например верхнему.

Пусть левая сторона секции, от которой начинается счет, следовательно, имеющая номер 1, лежит в верхнем слое; тогда правая сторона этой же секции окажется лежащей в нижнем слое под стороной секции с номером $y_1+1$. Число $y_1$, равное числу сторон секций, на которое надо перейти от левой стороны секции к правой, носит название „первого частичного шага“ обмотки (рис. 25).

Простая петлевая обмотка характеризуется тем, что конец первой секции соединяется с началом второй, стороны которой лежат рядом со сторонами первой, и место соединения подключается к пластине коллектора. Для того чтобы это получилось, обмотка должна после первого частичного шага $y_1$ вперед сделать так называемый „второй частичный шаг“ $y_2$ назад (рис. 26); очевидно, что для соединения с соседней секцией шаг $y_2$ должен отличаться от шага $y_1$ на единицу:

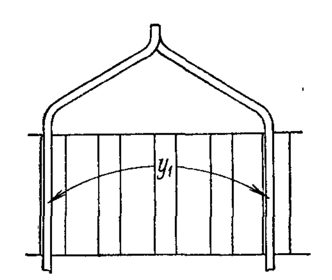



Рис. 25. Первый частичный шаг

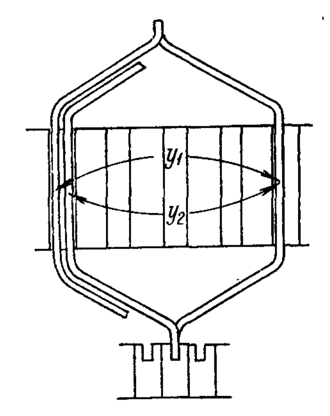



Рис. 26. Второй частичный шаг петлевой обмотки

$$y_2=y_1 \pm 1. \qquad (16)$$

При этом, если $y_2<y_1$ (знак минус в формуле), то следующая секция будет расположена правее первой, и обмотка носит название „прямо-ходовой“ или „правой“; такая обмотка представлена на рис. 27. Если же $y_2>y_1$ (знак плюс в фор-

муле), то следующая секция окажется левее исходной, и обмотка получит название „обратно-ходовой", или „левой"; пример такой обмотки дан на рис. 28.

Разность частичных шагов

$$y = y_1 - y_2 = 1 \qquad (17)$$

носит название „полного шага" петлевой обмотки.

Когда все секции петлевой обмотки уложены в пазы, конец последней секции соединяется с началом первой, замыкая

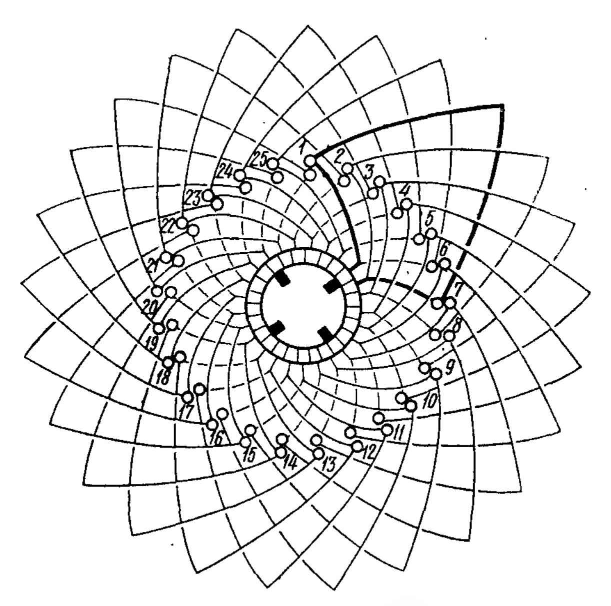



Рис. 27. Прямо-ходовая петлевая обмотка

обмотку в одно целое, не имеющее ни начала, ни конца. Это будет иметь место при любом числе секций; но для того чтобы обмотка могла работать, нужно, чтобы каждое соединение двух соседних секций было подключено к пластине коллектора. Таким образом, необходимым условием выполнимости петлевой обмотки является равенство чисел секций и пластин коллектора.

Число комплектов щеток на коллекторе при петлевой обмотке должно быть равно числу полюсов; места наложения щеток на коллектор разбивают обмотку на такое же число частей, которые по отношению к внешней цепи машины оказываются включенными параллельно. Таким образом, число параллельных ветвей в простой петлевой обмотке всегда равно числу полюсов:

$$2a = 2p. \qquad (18)$$

Если теперь взять второй частичный шаг равным

$$y_2 = y_1 \pm 2, \qquad (19)$$

то конец первой секции соединяется с началом секции, уже не соседней с первой, а лежащей от нее через одну.

Полный шаг будет теперь

$$y = y_1 - y_2 = \pm 2. \qquad (20)$$

Здесь возможны два случая.

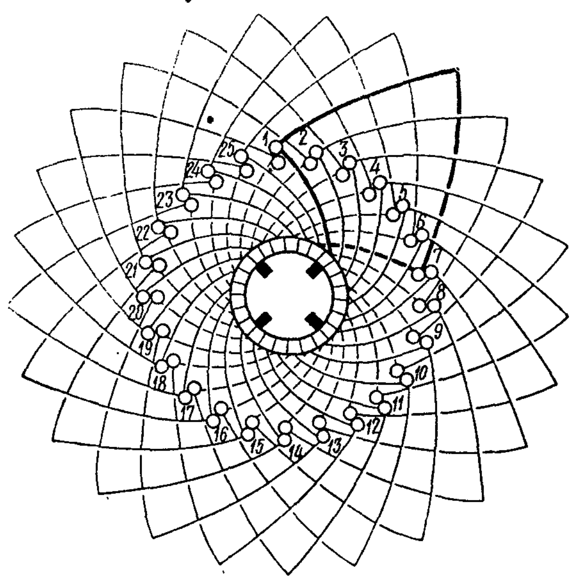



Рис. 28. Обратно-ходовая петлевая обмотка

Когда число секций и число пластин коллектора четны, в схему обмотки попадут секции только с нечетными номерами левых сторон, и обмотка замкнется, оставив половину секций и половину пластин коллектора неиспользованными; тогда из этих последних можно составить вторую точно такую же обмотку (рис. 29).

Но когда число секций и число пластин коллектора нечетны, то обмотка сначала сделает один обход вокруг якоря, захватывая только секции с нечетными номерами левых сторон, а затем второй обход, перейдя на секции с четными номерами, пример чего дан на рис. 30.

Такие обмотки носят общее название „сложно-петлевых"; в первом случае они называются „двукратно-замкнутыми", а во втором — „однократно-замкнутыми двухходовыми"; из них первые применяются очень редко, так что практически их можно не рассматривать.

По отношению к внешней цепи сложно-петлевая обмотка представляет удвоенное число параллельных ветвей против простой петлевой обмотки:

$$2a=2\cdot 2p=4p. \tag{21}$$

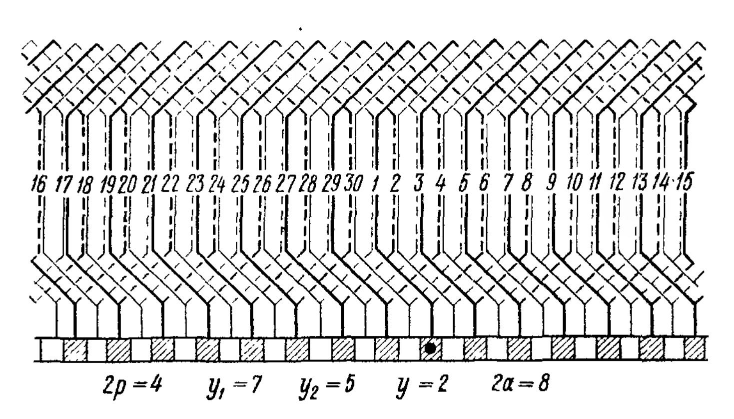



Рис. 29. Двукратно-замкнутая петлевая обмотка

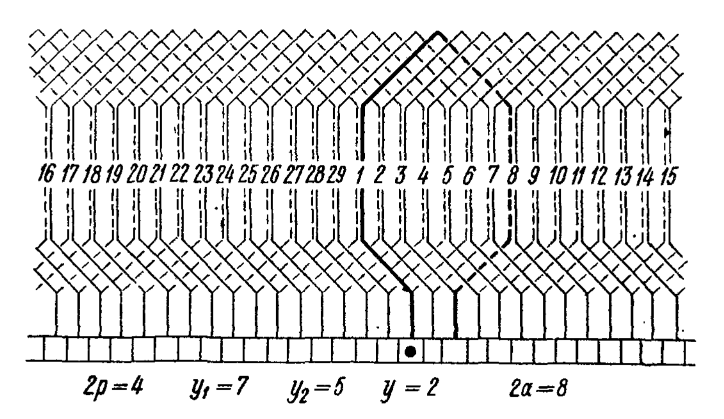



Рис. 30. Двухходовая однократно-замкнутая петлевая обмотка

Простая волновая обмотка характеризуется тем, что, сделав первый частичный шаг $y_1$ вперед, она делает затем второй частичный шаг $y_2$ в том же направлении, т. е. опять вперед, а не назад, как петлевая обмотка (рис. 31).

„Полным шагом" волновой обмотки называется сумма частичных шагов:

$$y=y_1+y_2. \tag{22}$$

Если машина имеет $p$ пар полюсов, то, сделав $p$ полных шагов $y$, обмотка должна обойти один раз вокруг якоря. Для

того чтобы получилась простая волновая обмотка, необходимо, чтобы конец последней секции первого обхода соединился с началом секции, соседней с той, от которой начат был первый обход; кроме того, число секций и число пластин коллектора и здесь должны быть равны друг другу.

Таким образом, произведение числа пар полюсов $p$ на полный шаг $y$ должно отличаться только на единицу от числа секций или равного ему числа пластин коллектора $K$:

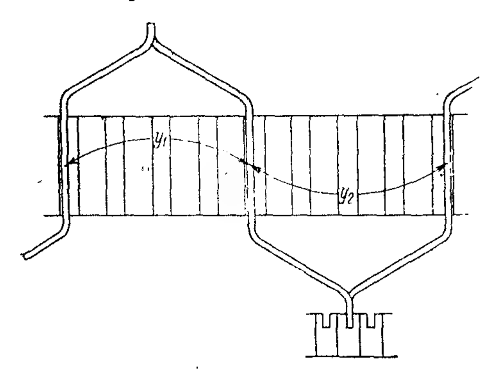



Рис. 31. Второй частичный шаг волновой обмотки

$$py = K \pm 1,$$

откуда полный шаг простой волновой обмотки

$$y = \frac{K \pm 1}{p}. \qquad (23)$$

Знак плюс здесь соответствует тому случаю, когда начало второго обхода лежит правее начала первого обхода; такая волновая обмотка носит название „прямо-ходовой" или „правой" (рис. 32).

Наоборот, знак минус соответствует случаю, когда начало второго обхода лежит левее начала первого обхода, и обмотка при этом называется „обратно-ходовой" или „левой" (рис. 33).

Из всего сказанного вытекает, что простая волновая обмотка может выполняться не при любом числе секций, хотя бы оно и было равно числу пластин коллектора, а только при таком, которое может удовлетворить условию (23). Так, четырехполюсные волновые обмотки могут выполняться только при нечетных числах секций и пластин коллектора, причем произвольно—в виде прямо-ходовых или обратно-ходовых; но с увеличением числа полюсов количество чисел секций, пригодных для выполнения волновой обмотки, быстро убывает, и разновидность выполнения обмотки перестает быть произвольной.

Это обстоятельство сильно ограничивает возможность применения простой волновой обмотки.

Как видно из рис. 32 и 33, в волновой обмотке между каждыми двумя ближайшими комплектами щеток одной и той же полярности оказывается включенной только одна секция, замкнутая накоротко через соединение этих комплектов друг с другом. Это будет иметь место при любом числе полюсов; таким образом, вне зависимости от последнего, по отношению

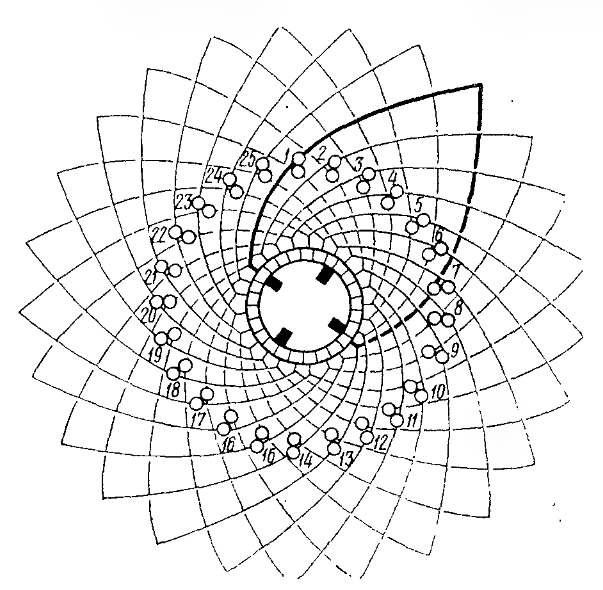



Рис. 32. Прямо-ходовая волновая обмотка

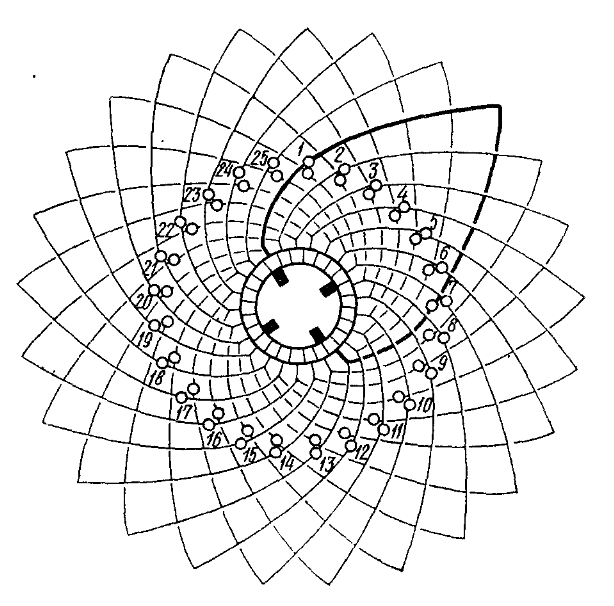



Рис. 33. Обратно-ходовая волновая обмотка

к внешней цепи обмотка разбивается всего лишь на две параллельные ветви:

$$2a = 2. \tag{24}$$

Если число секций не удовлетворяет условию (23), но половина его удовлетворяет ему, то можно выполнить обмотку с полным шагом:

$$y = \frac{K \pm 2}{p}. \tag{25}$$

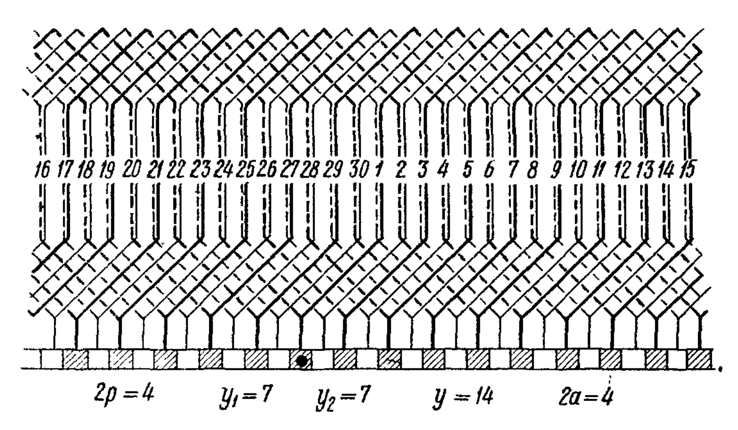



Рис. 34. Двукратно-замкнутая волновая обмотка

Эта обмотка замкнется, оставив половину секций и пластин коллектора неиспользованными, т. е. получится „двукратно-замкнутая" волновая обмотка (рис. 34), наподобие того как получилась двукратно замкнутая петлевая обмотка.

Совершенно ясно, что в ней число параллельных ветвей является удвоенным по сравнению с простой обмоткой, т. е.

$$2a = 2 \cdot 2 = 4. \tag{26}$$

За последние два-три десятилетия известное распространение получило сочетание на одном и том же якоре двух обмоток—петлевой и волновой, которое также может быть как простым, так и сложным, например, в виде однократно-замкнутой двухходовой обмотки. Благодаря своеобразной форме катушек, напоминающей распластанную лягушку, такое сочетание носит название „лягушечьей" обмотки. Однако эта обмотка находит применение главным образом в крупных и быстроходных машинах индивидуального исполнения с тяжелыми условиями работы, расчет которых благодаря своей сложности требует высокой квалификации расчетчика; поэтому она здесь более подробно не рассматривается.

## 6. УСЛОВИЯ ВЫПОЛНИМОСТИ ОБМОТОК

Во всех рассмотренных выше обмотках требовалось, чтобы число секций обмотки было равно числу пластин коллектора. Таким образом, для того, чтобы в каждом пазу лежало одно и то же количество сторон секций, иными словами, чтобы все катушки обмотки были одинаковы, число пластин коллектора должно делиться на число пазов; результат этого деления представляет число секций в катушке:

$$u = \frac{K}{Z} = \text{целое}. \tag{27}$$

Выше было указано, что петлевая обмотка может быть выполнена при всяком числе секций, лишь бы оно было равно числу пластин коллектора; следовательно, она выполняется при любом числе пазов, если последнее кратно числу пластин коллектора; однако далее будет видно, что это условие не является достаточным.

Волновая же обмотка выполняется не при всяком числе секций, а лишь при удовлетворяющем условию (23); следовательно, и не при всяком числе пазов, а лишь при таком, которое удовлетворяет условию

$$y = \frac{Zu \pm 1}{p}.$$

Если число пазов делится без остатка на число полюсов. то вместе с тем должно делиться на него и число секций, Это еще не значит, что и число пластин коллектора тоже делится на число полюсов; иногда встречаются случаи, рассматриваемые ниже, когда число пластин коллектора $K$ отличается на единицу от числа секций, однако пока пусть число пластин коллектора будет равно числу секций. Тогда при первом частичном шаге

$$y_1 = \frac{K}{2p} \tag{28}$$

обе стороны любой секции в каждый момент времени будут расположены совершенно одинаковым образом по отношению к двум соседним полюсам.

Такой шаг носит название „диаметрального“.

Если же число пазов $Z$ не делится на число полюсов $2p$, то диаметральный шаг невозможен, и остается только взять шаг $y_1$ по возможности более близким к диаметральному, т. е. наилучшим образом приближенно удовлетворяющим этому равенству.

Здесь могут встретиться два случая: выбранный шаг $y_1$ либо делится без остатка на число сторон секций в каждом слое паза $u$, либо не делится на него. На рис. 35 представлено, что происходит с секциями в этих двух случаях.

В первом случае, так же как и при диаметральном шаге, у всех секций, левые стороны которых лежат в верхнем слое какого-нибудь паза, правые стороны оказываются лежащими в нижнем слое одного и того же паза, и потому ширина всех секций одинакова. Такая обмотка носит название „равносекционной“.

Во втором случае правые стороны этих секций попадают в разные пазы, и обмотка получает название „ступенчатой“.

Ступенчатые обмотки неудобны в изготовлении и потому без крайней необходимости их лучше не применять.

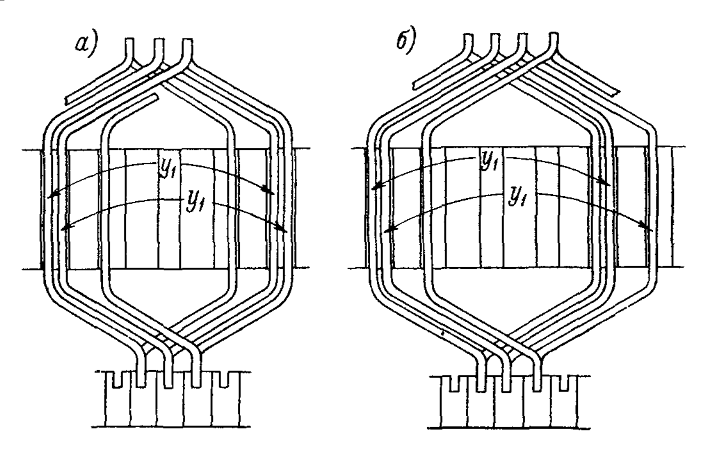



Рис. 35. Равносекционная и ступенчатая обмотки

Для того чтобы при изготовлении ступенчатых обмоток избежать необходимости укладки в разные пазы правых сторон секций, левые стороны которых лежат в одном и том же пазу, и наоборот, приходится разрезать ту секцию, которая отделяется от остальных со стороны, противоположной коллектору, и присоединять ее к разрезанной таким же образом секции того паза, в который она попадает. Тогда стороны секций в каждом слое любого паза могут быть изолированы совместно в одну катушку, что и показано на рис. 36. Недостатком этой конструкции является наличие лишних паек между половинами разрезанных секций со стороны, противоположной коллектору.

В относительно небольших, главным образом четырехполюсных машинах иногда встречается такое положение, когда число пластин коллектора $K$ не делится без остатка на число пазов $Z$, но будучи увеличено на единицу, делится на него и дает таким образом число сторон секций в катушке:

$$u = \frac{K+1}{Z}.$$

В этом случае приходится применять волновую обмотку, состоящую из $K+1$ секций, одна из которых остается не присоединенной к коллектору; такая секция носит название „мертвой секции". На рис. 37 дан пример обмотки с мертвой секцией. Как видно из него, в пределах полного шага этой секции приходится несколько удлинять лобовые части со стороны коллектора, что создает известное неудобство.

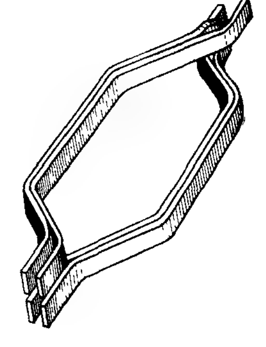


Рис. 36. Катушка ступенчатой обмотки

Иногда представляется необходимым применить волновую обмотку, но число пластин коллектора не допускает этого, не удовлетворяя равенству (23). Тогда приходится поступать следующим образом: полный шаг $y$ определяется из равенства

$$y = \frac{(K+1)-1}{p} \tag{29}$$

и обмотка выполняется так, как если бы число пластин коллектора и число секций было в действительности $K+1$. При выполнении такой обмотки удобно считать, что недостающая секция предшествует в схеме той секции, от которой начинается обмотка.

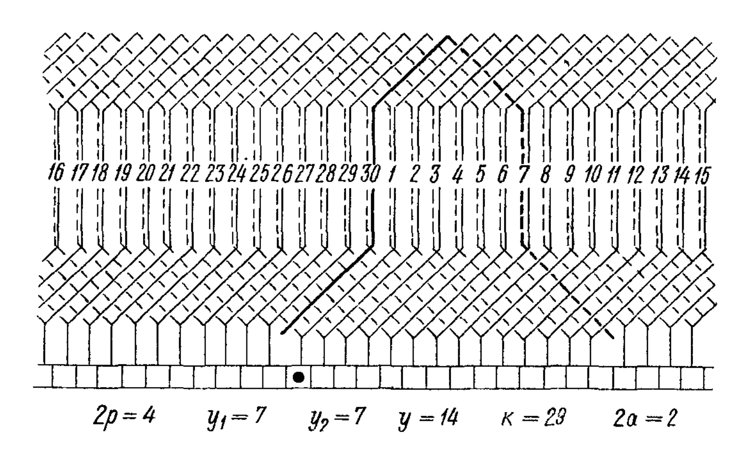



Рис. 37. Волновая обмотка с мертвой секцией

Особенность этой обмотки состоит в том, что из $p$ полных шагов, которые делает каждый обход обмотки вокруг якоря, один шаг последний в данном обходе — будет на единицу меньше остальных $p-1$ шагов, т. е. он будет равен:

$$y' = y - 1 = \frac{K}{p} - 1.$$

Недостающие секция и пластина коллектора заменяются проводником, замыкающим конец последней секции с началом первой, как представлено на рис. 38, и обмотка носит название „искусственно-замкнутой“ волновой обмотки.

Выше указывалось, что простая петлевая обмотка может быть выполнена при любом числе пластин коллектора $K$, если оно делится на число пазов $Z$. Однако это ещё не значит, что обмотка будет работать удовлетворительно. В самом деле, простая петлевая обмотка имеет число параллельных ветвей $2a$, равное числу полюсов $2p$; для того чтобы электродвижущие силы во

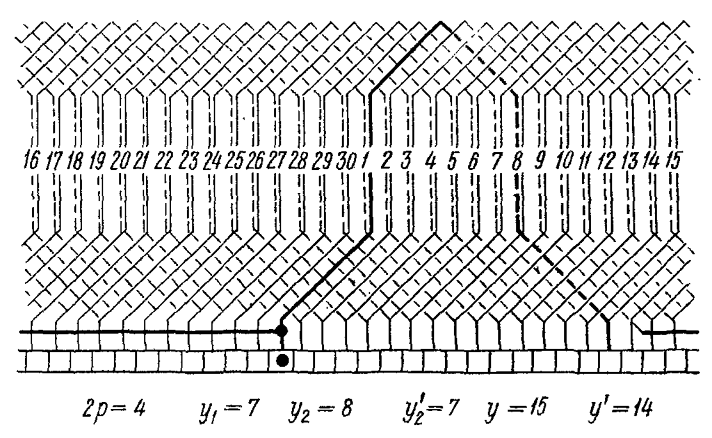



Рис. 38. Искусственно-замкнутая волновая обмотка

всех параллельных ветвях были одинаковы, необходимо, чтобы обмотка была симметрична, т. е. чтобы в состав всех пар параллельных ветвей в любой момент времени входило одинаковое число секций, одинаково расположенных по отношению к полюсам; но это может быть только при условии, что число секций, равное числу пластин коллектора $K$, делится на число пар параллельных ветвей $a$:

$$\frac{K}{a} = \text{целое.}$$

Если это условие не соблюдено, то под действием неравенства электродвижущих сил будут возникать уравнительные токи внутри обмотки, бесполезно нагревающие ее и вызывающие искрение щеток. Чем меньше секций приходится в среднем на одну параллельную ветвь, тем относительно значительнее будут эти неравенства электродвижущих сил; поэтому особенно в небольших машинах, имеющих относительно малые числа пластин коллектора, нужно избегать случаев, когда $K$ не делится на $a$. Следует отметить, что обмотка с диаметральным шагом всегда удовлетворяет этому условию.

Таким образом, условия симметричности простой петлевой обмотки могут быть записаны так:

$$\frac{Z}{a} = \text{целое}, \qquad \frac{K}{a} = \text{целое}.$$

Этим же условиям должны удовлетворять и двукратно-замкнутые петлевая и волновая обмотки.

Для двухходовых однократно-замкнутых петлевых обмоток, в которых число пар параллельных ветвей равно числу полюсов, достаточными условиями симметричности являются:

$$\frac{Z}{p} = \text{целое}, \qquad \frac{K}{p} = \text{целое}.$$

## 7. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Для того чтобы распределение токов между всеми параллельными ветвями петлевой обмотки якоря было равномерным, необходимо, чтобы электродвижущие силы во всех этих ветвях в любой момент времени были одинаковы и чтобы существовало равенство сопротивлений всех ветвей.

Оба эти условия будут обеспечены только в том случае, когда число пазов якоря делится на число пар полюсов:

$$\frac{Z}{p} = \text{целое}.$$

Действительно, только при этом условии проводники всех пар параллельных ветвей будут в любой момент времени одинаково расположены по отношению к полю главных полюсов.

Однако эта делимость хотя и необходима для предотвращения уравнительных токов, но недостаточна; неравенство электродвижущих сил в различных парах параллельных ветвей может происходить еще и по другой причине—вследствие не вполне точной симметричности постройки машины, в частности, из-за неравномерности зазора под различными главными полюсами, обусловливающей неравенство их потоков.

В тех ветвях, которые находятся в данный момент под полюсами с меньшим зазором, электродвижущие силы будут больше, чем в тех ветвях, которые находятся под полюсами, где зазор больше.

Для устранения образования уравнительных токов, замыкающихся через целые параллельные ветви и щеточный аппарат машины, применяются так называемые „уравнительные соединения".

Если число пазов $Z$ делится на число пар параллельных ветвей $a$, то при идеально правильной сборке машины электродвижущие силы в проводниках любых $a$ пазов, равноотстоя-

щих друг от друга по окружности якоря, будут всегда одинаковы.

Поэтому, если соединить между собой пластины коллектора, к которым присоединены секции, одинаковым образом расположенные в этих пазах, то по соединительным проводникам никакие токи проходить не будут.

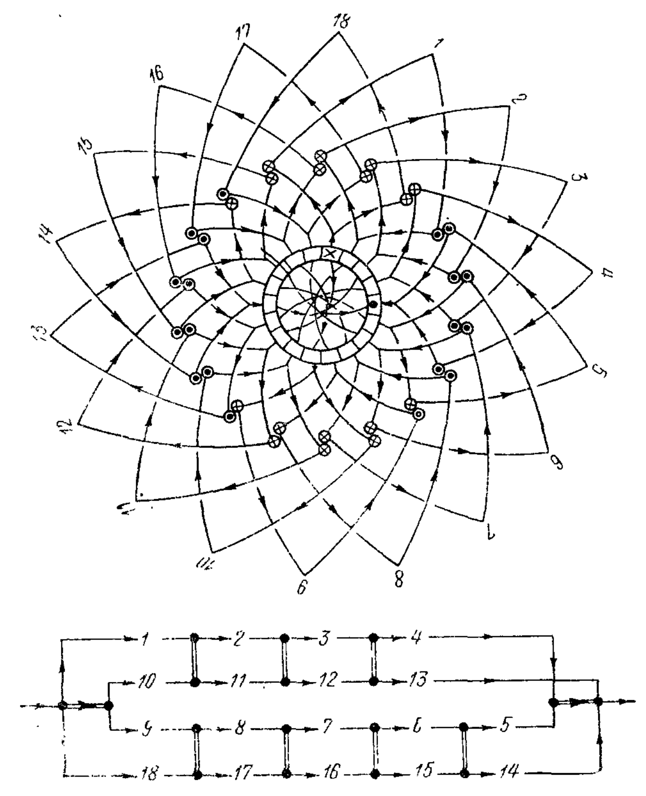



Рис. 39. Обмотка с полным числом уравнительных соединений

Если же сборка не идеальна, то в этих проводниках будут иметь место токи, которые выровняют разницу в электродвижущих силах, минуя щеточный аппарат машины. Чем больше таких уравнительных соединений имеет обмотка, тем лучше будет это выравнивание.

Если число пазов $Z$ делится на число пар полюсов $p$, то число пластин коллектора $K$ подавно должно делиться на число пар полюсов; следовательно, каждое уравнительное соединение должно соединять между собой $p$ пластин, номера которых отличаются друг от друга на $\frac{K}{p}$.

В пределе все пластины могут быть снабжены уравнительными соединениями, число которых будет $n_y = \frac{K}{p}$ и носит название „полного“ числа уравнительных соединений; пример этого дан на рис. 39.

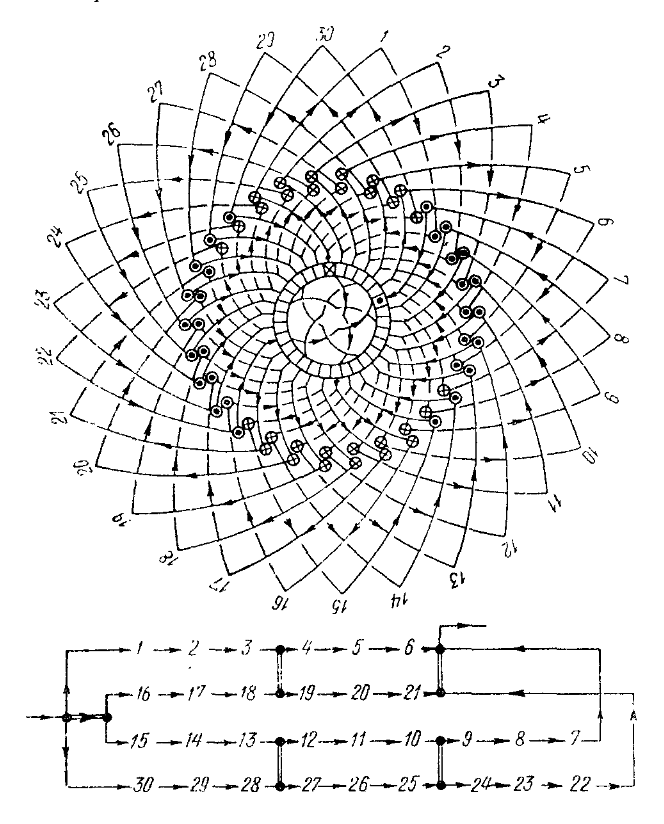



Рис. 40. Обмотка с неполным числом уравнительных соединений

Однако уравнительные соединения усложняют и удорожают обмотку, и в якоре не всегда оказывается достаточно места для полного их числа. Поэтому приходится уменьшать их число и соединять ими не все пластины коллектора, а только некоторую их часть. Чтобы это было возможно сделать, необходимо, чтобы полное число уравнительных соединений разлагалось на небольшие первоначальные множители. Так, если оно четно, то может быть выполнена половина всех возможных соединений, если делится на 3—одна треть и т. д.

На рис. 40 представлен пример схемы обмотки с неполным числом уравнительных соединений.

В крупных и в очень быстроходных машинах рекомендуется применять полное число уравнительных соединений; чем машина меньше и тихоходнее, тем меньшая часть всех возможных уравнительных соединений достаточна для их удовлетворительной работы.

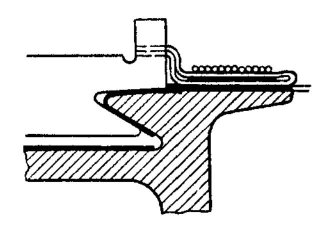


Рис. 41. Уравнительные соединеиия у коллектора

В тех случаях, когда число пластин коллектора на пару полюсов $\frac{K}{p}$ представляет собой простое число, не разлагающееся на первоначальные множители, применение неполного числа уравнительных соединений встречает некоторое затруднение в том, что места их подключения не могут быть вполне равномерно распределены по обмотке; тогда приходится принимать их число

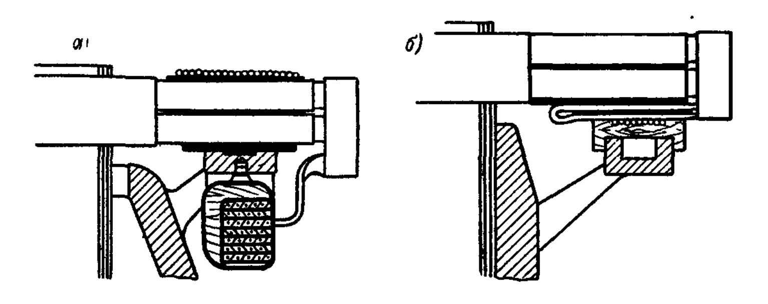



Рис. 42. Уравнительные соединения со стороны, противоположной коллектору

приближенно равным $^1/_2$, $^1/_3$ и т. д. всех возможных и распределять места их подключения лишь по мере возможности равномерно.

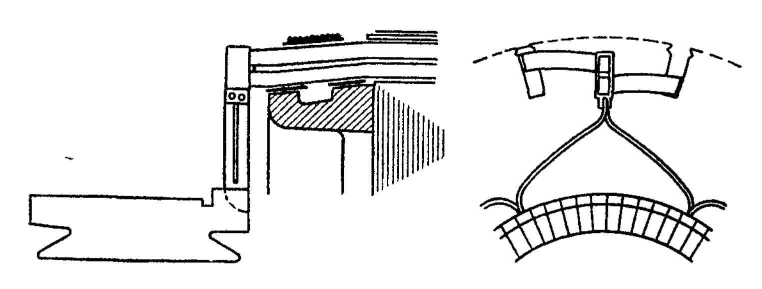


Рис. 43. Уравнительные соединения в петушках

В небольших четырехполюсных машинах вполне достаточным оказывается применение 3—4 уравнительных соединений.

Существует несколько способов выполнения уравнительных соединений. На рис. 41 представлен способ выполнения их со стороны коллектора; однако они могут быть с успехом выполнены и со стороны, противоположной коллектору, если соединять при этом не пластины коллектора, а головки соответствующих секций, как представлено на рис. 42,*а* и *б*.

В крупных машинах уравнительные соединения зачастую устраиваются так, что они одновременно выполняют роль петушков, как представлено на рис. 43.

Сечение проводника, из которого изготовляются уравнительные соединения, должно составлять примерно $^1/_4$ сечения проводника обмотки якоря.

Пример 9. Шестиполюсный якорь имеет $Z=63$ паза, а коллектор имеет $K=189$ пластин.

Требуется определить, какие числа параллельных ветвей могут быть осуществлены.

Число сторон секций в одном слое каждого паза или число секций в каждой катушке

$$u = \frac{K}{Z} = \frac{189}{63} = 3 = \text{целое};$$

следовательно, на основании равенства (27) может быть осуществлена простая петлевая обмотка с числом пар параллельных ветвей $a=3$.

Число пазов не делится на число полюсов:

$$\frac{Z}{2p} = \frac{63}{6} = 10{,}5 = \text{дробное},$$

поэтому на основании равенства (28) диаметральный шаг взят быть не может.

Для того чтобы обмотка получилась равносекционной, следует принять первый частичный шаг

$$y_1=30=3\cdot 10,$$

так как он кратен числу секций в катушке $u=3$; тогда второй частичный шаг должен быть для прямо-ходовой обмотки

$$y_2 = y_1 - 1 = 30 - 1 = 29.$$

Число пластин коллектора делится на число пар параллельных ветвей:

$$\frac{K}{a} = \frac{189}{3} = 63 = \text{целое};$$

поэтому может быть применено полное число уравнительных соединений

$$63=3\cdot 3\cdot 7;$$

но могут быть взяты и неполные числа уравнительных соединений:

| | | |
|---|---|---|
| 21 | уравнительное соединение, т. е. | $^1/_3$ всех возможных; |
| 9 | » » | » $^1/_7$ » » |
| 7 | » » | » $^1/_9$ » » |
| 3 | » » | » $^1/_{21}$ » » |

Впрочем, последнее число слишком мало и потому не может быть принято во внимание.

Простая волновая обмотка не может быть выполнена на основании равенства (23), потому что оба числа:

$$K+1=189+1=190$$

и

$$K-1=189-1=188$$

не делятся на число пар полюсов, т. е. на 3.

Равным образом не может быть выполнена и волновая обмотка с мертвой секцией, потому что

$$\frac{K+1}{Z}=\frac{189+1}{63}=3\frac{1}{63} \text{ — дробное;}$$

она могла бы быть применена, если бы число пластин было $K=188$.

Но на основании равенства (29) может быть выполнена искусственно-замкнутая волновая обмотка, поскольку

$$y=\frac{K+1-1}{p}=\frac{189+1-1}{3}=63=\text{целое.}$$

Чтобы и эта обмотка получилась равносекционной, следует взять первый частичный шаг

$$y_1=30 \quad \text{или} \quad y_1=33;$$

тогда второй частичный шаг будет

$$y_2=y-y_1=63-30=33 \quad \text{или} \quad y_2=63-33=30.$$

Для перехода через место искусственного замыкания при первом сочетании частичных шагов целесообразно взять последний шаг обхода уменьшенным на единицу против $y_2$; тогда обмотка будет обратно ходовой, и шаги в обходе будут чередоваться так:

$$30-33-30-33-30-32.$$

Напротив, при втором сочетании частичных шагов будет удобнее последний шаг принять увеличенным на единицу против $y_2$; это дает прямо-ходовую обмотку с чередованием шагов

$$33-30-33-30-33-31.$$

Двукратно-замкнутая волновая обмотка не может быть выполнена ввиду нечетности числа пластин коллектора, но нет препятствий к осуществлению двухходовой однократно-замкнутой петлевой обмотки, причем последняя может быть снабжена любым из указанных выше чисел уравнительных соединений; для этого достаточно при первом частичном шаге $y_1=30$ принять второй частичный шаг $y_2=28$.

Таким образом, в данном якоре могут быть достигнуты следующие числа параллельных ветвей:

$2a=2$ (волновая искусственно замкнутая обмотка),
$2a=6$ (простая петлевая обмотка),
$2a=12$ (двухходовая петлевая однократно замкнутая обмотка).

Пример 10. Четырехполюсный якорь имеет $Z=29$ пазов, а коллектор имеет $K=87$ пластин.

Требуется определить, какие типы обмоток могут быть осуществлены.

Число сторон секций в одном слое паза или число секций в катушке

$$u=\frac{K}{Z}=\frac{87}{29}=3 \text{ — целое;}$$

поэтому может быть осуществлена простая петлевая обмотка с числом пар параллельных ветвей $a=2$.

Число пазов не делится ни на число полюсов, ни на число пар полюсов:

$$\frac{Z}{p} = \frac{29}{2} = 14,5 = \text{дробное}.$$

Поэтому не только нельзя применить диаметральный шаг, но и нет возможности устройства уравнительных соединений, что является доводом против применения простой петлевой обмотки.

Простая волновая обмотка может быть выполнена, причем в виде как прямо-ходовой, так и обратно-ходовой, поскольку оба числа

$$K + 1 = 87 + 1 = 88,$$

$$K - 1 = 87 - 1 = 86$$

четны, т. е. делятся на число пар полюсов.

Полный шаг обмотки в первом случае

$$y = \frac{K+1}{p} = \frac{87+1}{2} = 44,$$

а во втором

$$y = \frac{K-1}{p} = \frac{87-1}{2} = 43.$$

Для того чтобы обмотка получилась равносекционной, следует принять первый частичный шаг кратным числу секций в катушке $u = 3$; наиболее подходящим для этого будет

$$y_1 = 21 = 3 \cdot 7.$$

Тогда второй частичный шаг будет в первом случае

$$y_2 = y - y_1 = 44 - 21 = 23,$$

а во втором

$$y_2 = 43 - 21 = 22.$$

По причине нечетности числа пластин $K$ двукратно-замкнутая волновая обмотка не может быть выполнена; хотя и нет препятствий против выполнения двухходовой однократно-замкнутой петлевой обмотки, но ввиду отсутствия возможности применения уравнительных соединений от этого следует воздержаться.

Таким образом, единственным приемлемым типом обмотки здесь является простая волновая.

## 8. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ОБМОТОК

Руководящим документом при выполнении обмотки может являться ее схема.

Схема обмотки обладает тем преимуществом, что дает полное и наглядное представление об обмотке и всех ее соединениях; но огромным ее недостатком является большая трудоемкость выполнения, в особенности в якорях больших машин, имеющих сотни секций.

Существует две разновидности схем:

1. „Круговые“ схемы, при которых секции с их лобовыми частями наносятся на профиль сердечника якоря с его пазами, в которых каждая сторона секции занимает положенное ей место.

2. „Развернутые“ схемы, изображающие наружную поверхность якоря, развернутую в плоскость; при этом стороны секций, находящиеся в действительности друг над другом, приходится изображать лежащими рядом.

Исполнение развернутых схем значительно проще, так как не требует применения циркуля, не нуждается в выполнении деления окружности на большое число равных частей и не столь сильно зависит от тщательности черчения; но некоторым их недостатком является наличие разрыва, по которому производится разворачивание в плоскость. Этот разрыв требует повышенного внимания при изображении рассеченных им секций, части которых оказываются лежащими на противоположных концах чертежа.

Примерами круговых схем являются рис. 27, 28, 32, 33, 39 и 40; примерами развернутых—рис. 29, 30, 34, 37 и 38.

Во всех случаях вычерчивание схемы начинается с нанесения условных изображений сторон секций: в виде небольших кружков — при круговой схеме и в виде отрезков прямых—при развернутой. В последнем случае целесообразно принять различные условные обозначения для сторон секций верхнего и нижнего слоев обмотки—например, сплошные линии для верхнего слоя и пунктирные — для нижнего.

После этого наносится нумерация сторон секций по какому-либо слою — обычно верхнему, и условно изображается коллектор с его пластинами так, как это сделано на всех перечисленных выше рисунках. Как правило, первый номер приписывается стороне секции, лежащей у левой стенки какого-нибудь паза, принимаемого за первый, если смотреть на него со стороны коллектора и сверху. Затем проставляется нумерация сторон секций—в круговых схемах по направлению вращения часовой стрелки, а в развернутых—слева направо.

Далее в соответствии с принятым первым частичным шагом $y_1$ со стороны, противоположной коллектору, наносится лобовая часть первой секции; она должна соединить первую сторону секции верхнего слоя с $y_1+1$-й стороной секции нижнего слоя. Когда первая лобовая часть нанесена, все остальные лобовые части со стороны, противоположной коллектору, могут быть выполнены совершенно механически; лишь при ступенчатых обмотках приходится следить за тем, чтобы лобовые части секций, делающих переход в следующий паз, были соответственно удлинены.

Когда это сделано, можно приступить к изображению лобовых частей секций со стороны коллектора, для чего правая сторона первой секции, лежащая в нижнем слое, в соответствии с принятым вторым частичным шагом $y_2$ соединяется с левой стороной следующей секции, лежащей в верхнем слое—при петлевой обмотке вблизи от левой стороны первой секции, а при волновой—на расстоянии около двух полюсных делений от нее.

В случае петлевой обмотки все лобовые части со стороны коллектора могут быть нанесены после этого так же механически, как и со стороны, противоположной коллектору; но в случае волновой обмотки нужно продолжать первый обход попеременно шагами $y_1$ и $y_2$ до тех пор, пока обмотка не обойдет якорь один раз. Только проверив, что после первого обхода обмотка приходит именно туда, откуда должен начинаться второй обход, можно приступить к механическому выполнению лобовых частей со стороны коллектора, и то лишь в случае, когда в обмотке нет ни мертвой секции, ни искусственного замыкания. В этих же двух частных случаях лучше выполнять лобовые части не подряд, а следуя ходу обмотки, дабы не впасть в ошибку в том месте, где нормальное течение обмотки прерывается мертвой секцией или искусственно замыкающей перемычкой.

Полезно изображать более жирными линиями: при петлевой обмотке—первую секцию, а при волновой—весь первый обход вокруг якоря; это придает схеме бóльшую наглядность.

По окончании изображения всех лобовых частей можно соединить секции короткими штрихами с пластинами коллектора.

Заключительной операцией по построению схемы является нанесение уравнительных соединений, если они предусматриваются в данной обмотке. Для этого надо сначала нанести полностью одно из них, соединив им пластины или головки секций в количестве $p$ штук, равноотстоящих друг от друга по окружности, а затем уже наметить точки присоединения остальных.

## 9. ТАБЛИЦЫ ОБМОТОК

Несмотря на то, что составление схем обмоток может быть сведено к выполнению ряда совершенно механических операций, только время от времени прерываемых несложными рассуждениями, оно является кропотливой и трудоемкой работой, если и не требующей особенно высоких чертежных навыков, то во всяком случае отнимающей много времени.

Между тем для возможности выполнения обмотки наличие схемы отнюдь не обязательно; она может быть с успехом заменена таблицей. Мало того: обмотчики, привыкшие работать по таблицам обмоток, предпочитают их схемам, поскольку чтение таблицы много легче, чем чтение схемы, в особенности уже бывшей в употреблении и потому утратившей четкость.

Таблицы обмоток составляются следующим образом: номера сторон секций, подлежащих соединению друг с другом, выписываются в две колонки, причем в левой находятся номера верхнего слоя, а в правой—нижнего. Верхним номером левого столбца берется 1; тогда против него в правом столбце должен стоять номер $y_1+1$; таковы номера сторон первой сек-

ции. В следующей строке таблицы будут находиться номера сторон той секции, которая соединяется с первой. При петлевой обмотке это будет: в левом столбце номер

$$y_1+1-y_2=y+1,$$

и в правом—номер

$$y_1+1-y_2+y_1=y+1+y_1$$

и так далее.

При волновой обмотке второй частичный шаг не вычитается из первого, а складывается с ним; поэтому во второй строке будут стоять номера: в левом столбце

$$y_1+1+y_2=y+1$$

и в правом

$$y_1+1+y_2+y_1=y+1+y_1$$

и так далее.

Для уравнительных соединений обычно составляется отдельная таблица. Вне зависимости от того, с какой стороны якоря располагаются уравнительные соединения, в эту таблицу вписываются номера сторон секций верхнего слоя, примыкающих к уравнительным соединениям. Если первое уравнительное соединение начинается от стороны секции верхнего слоя с номером 1, то оно должно охватывать также стороны секций верхнего слоя с номерами:

$$\frac{K}{p}+1,\ 2\frac{K}{p}+1,\ 3\frac{K}{p}+1,\ldots,$$

где $K$—число пластин коллектора, равное числу сторон секций в одном слое.

Если обмотка снабжается полным числом уравнительных соединений, то для каждого последующего соединения номера будут получаться после этого путем увеличения на единицу всех номеров предыдущего.

Если же обмотка снабжается не полным числом уравнительных соединений, а только некоторой $\frac{1}{m}$ частью, где $m$ есть один из множителей числа пластин на одну пару полюсов, которое равно $\frac{K}{p}$, то номера для каждого последующего соединения получаются путем прибавления $m$ к номерам предыдущего.

Пример 11. Требуется составить таблицу простой петлевой обмотки якоря из примера 9.

Первый частичный шаг обмотки

$$y_1=30,$$

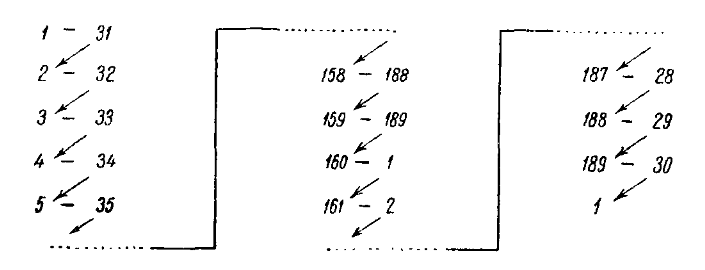
второй частичный шаг

$$y_2=29$$

и полный шаг

$$y=1.$$

Таблица составляется поочередным прибавлением и отнятием этих шагов и имеет следующий вид:




Уравнительные соединения в этой обмотке должны соединять пластины коллектора, номера которых отличаются друг от друга на величину

$$\frac{K}{p} = \frac{189}{3} = 63.$$

Таким образом, первое соединение охватывает номера пластин:

$$1 - 64 - 127 - 1.$$

Если предполагается снабдить обмотку полным числом уравнительных соединений, то для всех остальных соединений таблица будет выглядеть так:

2 — 65 — 128 — 2,
3 — 66 — 129 — 3,
4 — 67 — 130 — 4,
. . . . . . . . . . .
63 — 126 — 189 — 63.

Но здесь можно применить и неполное число уравнительных соединений; так, например, если взять $\frac{1}{3}$ всех возможных, то таблица для них будет писаться так:

2 — 65 — 128 — 2,
5 — 68 — 131 — 5,
8 — 71 — 134 — 8,
. . . . . . . . . . .
62 — 125 — 188 — 62.

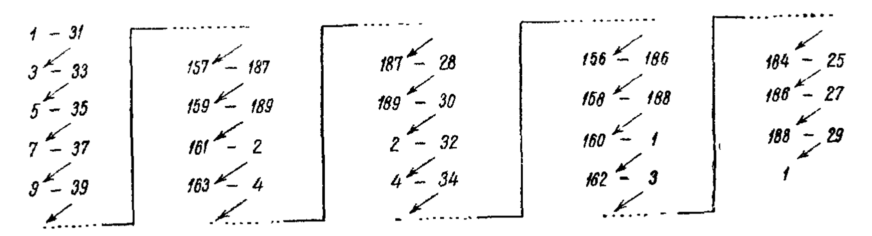
Если же взять $\frac{1}{7}$ всех возможных соединений, то таблица примет вид:

1 — 64 — 127 — 1,
8 — 71 — 134 — 8,
15 — 78 — 141 — 15,
. . . . . . . . . . .
57 — 120 — 183 — 57.

Если бы потребовалось составить таблицу для возможной на этом якоре двухходовой петлевой однократно-замкнутой обмотки, имеющей шаги:

$$y_1 = 30, \quad y_2 = 28, \quad y = 2,$$

то она выглядела бы следующим образом:




Пример 12. Требуется составить таблицу простой волновой обмотки якоря из примера 10.

Частичные шаги обратно-ходовой обмотки

$$y_1 = 21 \text{ и } y_2 = 22$$

и полный шаг

$$y = 43.$$

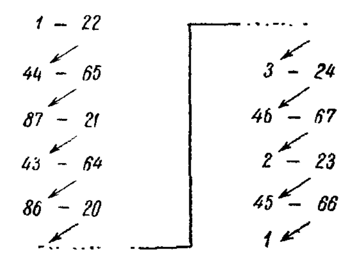
Таким образом, от стороны секции с номером 1 обмотка идет к стороне секции с номером

$$1 + y_1 = 1 + 21 = 22,$$

а затем дальше вперед к стороне секции с номером

$$1 + y_1 + y_2 = 22 + 22 = 44$$

и так далее, и таблица имеет вид:




## 10. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ

Магнитное поле, создаваемое главными полюсами машины постоянного тока, распределено по окружности якоря с различной плотностью, или, как ее называют, „магнитной индукцией" *B*. Единица для измерения магнитной индукции носит название „гаусс" [*гс*].

Если магнитная индукция распределена равномерно по некоторой площади, то произведение этой индукции *B* в гауссах на величину площади *Q* в квадратных сантиметрах называется „магнитным потоком" Ф через эту площадь; единица для измерения магнитного потока носит название „максвелл" [*мкс*].

Если же индукция распределена по данной площади неравномерно, то для определения магнитного потока надо сначала найти среднее значение индукции на этой площади.

В большинстве случаев башмакам главных полюсов придается такая форма, что зазор между ними и якорем является равномерным почти под всем полюсом и только по краям увеличивается примерно до двойной величины (рис. 44). При этом

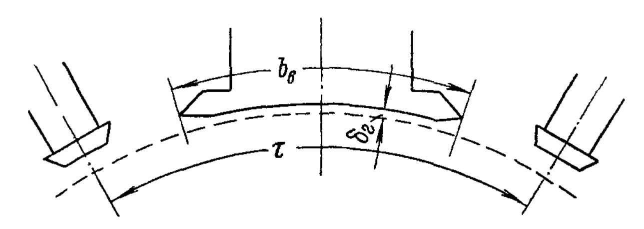



Рис. 44. Типичная форма башмака главного полюса

распределение индукции в зазоре имеет следующий вид: под всей средней частью башмака она сохраняет примерно постоянное значение, начинает несколько понижаться в тех местах, где зазор увеличивается, и резко падает за пределами башмака, обращаясь в нуль в середине промежутка между соседними полюсами (рис. 45).

Вдоль оси машины можно считать распределение индукции равномерным по всей расчетной длине якоря $l$.

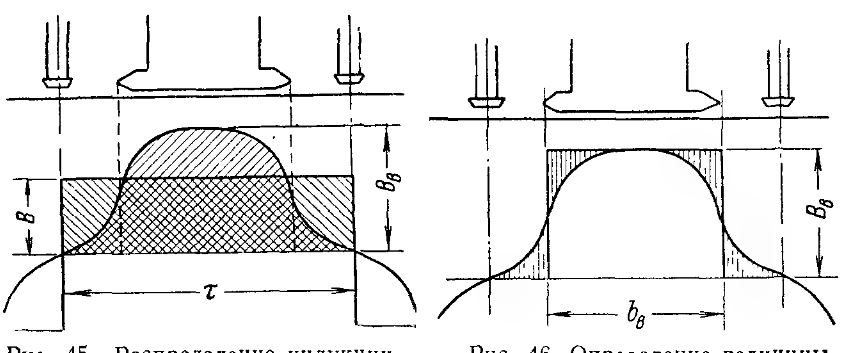



Рис. 45. Распределение индукции под полюсом

Рис. 46. Определение величины магнитного потока

Таким образом, поток каждого полюса распределен по площади, ширина которой $\tau$ равна расстоянию между серединами междуполюсных промежутков, а длина—расчетной длине якоря $l$, и для вычисления его величины следовало бы прежде всего найти среднее значение индукции на этой площади. Это среднее значение равно высоте прямоугольника, основанием которого служит расстояние $\tau$, а площадь равновелика площади, заключающейся между кривой распределения индукции и горизонтальной осью ее графика.

Однако такая операция довольно сложна; гораздо проще сделать предположение, очень близкое к действительности, что заштрихованные площадки на рис. 46 между кривой индукции, горизонтальной осью и двумя вертикальными прямыми, проходящими через края полюсного башмака, равновелики заштрихованным площадкам между кривой индукции, этими же вертикальными прямыми и горизонтальной прямой, касательной к кривой индукции. Тогда прямоугольник, основанием которого служит полюсная дуга, а высотой — наибольшее значение индукции под серединой полюсного башмака, также будет равновелик искомой площади кривой индукции.

Отсюда следует, что магнитный поток Ф одного главного полюса может быть определен как произведение наибольшей индукции под его башмаком $B_в$ в *гс* на полюсную дугу $b_в$ в *см* и на расчетную длину машины $l$ в *см*:

$$\Phi = B_в b_в l \; [мкс].$$

Но согласно формуле (8) произведение полюсной дуги $b_в$ на расчетную длину $l$ представляет площадь зазора $Q_в$, и потому

$$\Phi = B_в Q_в \; [мкс]. \qquad (30)$$

Если прямолинейный проводник длиной $l$ [*см*] движется с постоянной скоростью $v$ [*см/сек*] в магнитном поле, индукция которого в каждый момент времени имеет одну и ту же величину $B$ [*гс*] по всей длине проводника, причем направления самого проводника, его движения и магнитного поля взаимно перпендикулярны, то в проводнике наводится электродвижущая сила, значение которой $e$ в вольтах может быть определено из равенства:

$$e = Bvl \cdot 10^{-8} \; [в].$$

Пусть обмотка якоря состоит из $N$ проводников и имеет $2a$ параллельных ветвей; тогда каждая параллельная ветвь состоит из $\frac{N}{2a}$ последовательно включенных проводников, электродвижущие силы которых складываются. Так как различные проводники каждой параллельной ветви в любой момент времени находятся в местах с различными значениями индукции, то и электродвижущие силы в них различны; но сумма этих электродвижущих сил сохраняется в достаточной степени неизменной. Поэтому ее величина может быть принята равной произведению числа проводников одной параллельной ветви на среднее значение электродвижущей силы в одном проводнике.

Но вместо определения среднего значения электродвижущей силы можно предположить, что электродвижущие силы наводятся только в тех проводниках, которые в данный

момент находятся под полюсным башмаком, и что индукция под ним всюду постоянна и равна $B_в$. Число этих проводников во столько раз меньше $\frac{N}{2a}$, во сколько сумма полюсных дуг всех $2p$ полюсов меньше длины окружности якоря.

Таким образом, электродвижущая сила всей обмотки будет равна:

$$E = B_в v l \frac{N}{2a} \frac{2pb_в}{\pi D} \cdot 10^{-8} \quad [в].$$

Если якорь с диаметром $D$ вращается со скоростью $n$ [об/мин], то его окружная скорость равна

$$v = \frac{\pi Dn}{60} \quad [см/сек],$$

поэтому

$$E = B_в \frac{\pi Dn}{60} l \frac{N}{2a} \frac{2pb_в}{\pi D} \cdot 10^{-8} = B_в \frac{n}{60} l \frac{Np}{a} b_в \cdot 10^{-8} \quad [в].$$

Выше было показано, что

$$B_в b_в l = \Phi \quad [мкс];$$

отсюда окончательно

$$E = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi \cdot 10^{-8} \quad [в]. \qquad (31)$$

Таким образом, электродвижущая сила в обмотке якоря пропорциональна магнитному потоку, скорости вращения, числу проводников якоря и числу пар полюсов и обратно пропорциональна числу пар параллельных ветвей обмотки.

## 11. РАСЧЕТ ЧИСЛА ПРОВОДНИКОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Обычно при расчете машины постоянного тока являются заданными напряжение и скорость вращения. В первом приближении можно считать, что напряжение равно электродвижущей силе в обмотке якоря; таким образом, расчет сводится к нахождению величины магнитного потока, числа проводников обмотки якоря и ее типа, определяющего число параллельных ветвей.

Создается впечатление, что каждая из этих величин порознь может быть выбрана произвольной, так как, например, равенство (31) может быть удовлетворено при любом наперед заданном значении магнитного потока, стоит лишь решить его относительно числа проводников и подставить все заданные величины:

$$N = \frac{60Ea \cdot 10^8}{\Phi pn}. \qquad (31a)$$

Однако в действительности это не так; ни поток, ни число проводников не могут быть выбраны произвольно.

В самом деле, если выбранная величина потока слишком мала для данной машины, то последняя будет недоиспользована, т. е. от нее нельзя будет получить той мощности, которую она могла бы дать, так как число проводников окажется чрезмерно велико и сечение их слишком мало. Напротив, если поток выбран чрезмерно большим, то его не удастся создать, так как магнитная цепь машины будет пересыщена.

Число проводников $N$ и число параллельных ветвей $2a$ также не могут быть произвольными, потому что они определяются числом пластин коллектора и числом пазов якоря, т. е.,

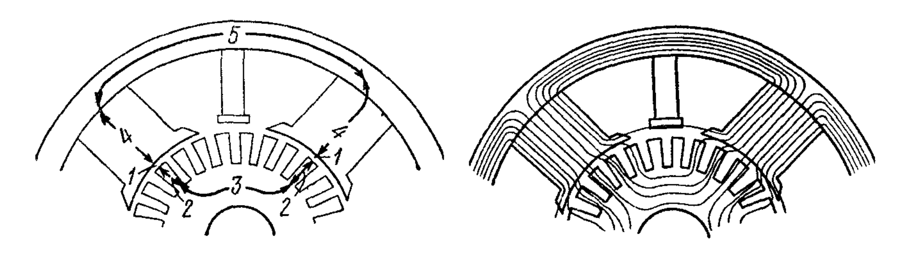



Рис. 47. Пять участков магнитной цепи

Рис. 48. Распределение магнитного потока

иначе говоря, условиями выполнимости обмотки. Нормально число проводников должно делиться на удвоенное число пластин коллектора, чтобы все секции имели одинаковое число витков; только при проволочных обмотках мелких машин допускаются отклонения от этого правила.

Таким образом, правильное решение задачи имеет место тогда, когда при выполнимом числе проводников магнитный поток не будет ни слишком мал, ни слишком велик.

Для суждения о правильности выбора величины магнитного потока нужно обратиться к данным того огромного опыта, который накоплен практикой расчета машин постоянного тока, и проверить, какие индукции получаются в различных участках магнитной цепи машины.

Таких участков можно различить всего пять (рис. 47): 1—зазор между башмаками главных полюсов и якорем; 2—зубцы якоря; 3—тело якоря; 4—сердечники главных полюсов; 5—станина.

Индукция в зазоре $B_в$ может быть получена делением потока на расчетную площадь сечения зазора $Q_в$:

$$B_в = \frac{\Phi}{Q_в} \; [гс]. \quad (32)$$

В правильно рассчитанной машине ее значение должно заключаться в пределах 5000—9000 *гс*, причем нижний предел относится к малым и быстроходным машинам, а верхний—к крупным и тихоходным; кроме того, значение этой индукции может быть принято тем более высоким, чем лучше вентиляция машины.

Индукция в зубцах якоря $B_з$ получается делением потока на расчетную площадь сечения зубцов $Q_з$:

$$B_з = \frac{\Phi}{Q_з} \; [гс]. \tag{33}$$

Ее значение не должно превосходить 18 000—20 000 *гс* и только в крайних случаях может быть допущено до 22 000 *гс*.

Пройдя слой зубцов, магнитный поток вступает в тело якоря, где разветвляется на две половины (рис. 48); поэтому значение индукции в теле якоря $B_m$ получается из равенства:

$$B_m = \frac{\Phi}{2Q_m} \; [гс]. \tag{34}$$

Не следует допускать значения этой индукции выше 11 000—13 000 *гс*.

Поток, проходящий по сердечнику главного полюса, больше рабочего потока Ф в зазоре и якоре, так как существует рассеяние (утечка) магнитного потока между соседними полюсами; поэтому для определения индукции в сердечнике главного полюса $B_г$ следует умножить поток Ф на некоторый коэффициент $k_p > 1$ и разделить на сечение сердечника $Q_г$:

$$B_г = \frac{k_p \Phi}{Q_г} \; [гс]. \tag{35}$$

Для полюсов, наборных из листовой стали, индукция в сердечнике не должна превышать 14 000—16 000 *гс*; но для литых сердечников, встречающихся в машинах очень старой постройки, она должна приниматься не выше 12 000—14 000 *гс* при стальном литье и 8000—9000 *гс* при чугунном.

В станине, как и в теле якоря, магнитный поток разветвляется на две половины; поэтому индукция в станине $B_c$ определяется по формуле:

$$B_c = \frac{k_p \Phi}{2Q_c} \; [гс]. \tag{36}$$

Для стальных станин — литых, кованых или сварных из гнутой листовой стали — эта индукция может быть допущена до 10 000—12 000 *гс*; но для чугунных ее не следует принимать более 6000—7000 *гс*.

Рассеяние потока главных полюсов, учитываемое коэффициентом $k_p$, зависит в первую очередь от отношения полюсной дуги к промежутку между полюсами; чем это отношение

больше, тем выше должно быть принято значение коэффициента. Кроме того, на него влияет также наличие добавочных полюсов в промежутках между главными—чем относительно шире башмаки добавочных полюсов, тем больше рассеяние; нормально его значение для современных машин может быть принято равным 1,2.

Расчет числа проводников обмотки якоря должен начинаться с предварительного определения величины магнитного потока и проверки соответствующих ему индукций в отдельных участках магнитной цепи. При этом лучше всего исходить из задаваемой наперед индукции в зазоре $B_в$, выбранной в соответствии с размерами машины и ее исполнением.

После этого по формуле (31a) производится определение предварительного числа проводников, сопровождаемое его проверкой в отношении возможности выполнения обмотки в соответствии с числами пазов якоря $Z$ и пластин коллектора $K$, которые во многих случаях предопределяют тип обмотки, а следовательно, и число ее параллельных ветвей $2a$.

Решением задачи будет нахождение ближайшего числа проводников, удовлетворяющего условиям выполнимости обмотки. В большинстве случаев таких чисел будет два: больше предварительного и меньше его.

Увеличение действительного числа проводников против предварительного ведет к уменьшению индукций во всех участках магнитной цепи; напротив, его уменьшение ведет к увеличению индукций и может быть принято только тогда, когда возросшие индукции все же еще не выходят из приемлемых пределов.

Для каждого из возможных чисел проводников следует определить значение магнитного потока и индукций во всех участках магнитной цепи.

При обмотках из мягких секций обычно удается подогнать общее число проводников $N$ к такой величине, при которой значения индукций ни в одном из участков магнитной цепи не выходят из рекомендуемых пределов. Этому очень помогает то обстоятельство, что допустимо брать неодинаковые числа витков в секциях; так, например, при наиболее употребительном числе секций в катушке $u = 3$ можно отступить на единицу в обе стороны в числе витков средней секции от чисел витков в обеих крайних секциях паза; это значит, что при $u = 3$ число проводников в пазу $s_п$ может принимать любые четные значения. Так, например, возможны следующие сочетания:

| Число витков в секциях | Число проводников в пазу |
|---|---|
| 7—7—7, | $3 \cdot 7 \cdot 2 = 42$, |
| 7—6—7, | $(2 \cdot 7 + 6) \cdot 2 = 40$, |
| 6—7—6, | $(2 \cdot 6 + 7) \cdot 2 = 38$, |
| 6—6—6, | $3 \cdot 6 \cdot 2 = 36$. |

и т. д.

При расчете машины на более высокое напряжение, чем первоначальное, или в том случае, когда последнее неизвестно ввиду отсутствия фирменного щитка, следует делать проверку величины напряжения между двумя соседними пластинами коллектора, определяемого по формуле:

$$e_к = \frac{2p}{K} U \cdot 2 \ [в].$$

Во избежание опасности сильного искрения на коллекторе, грозящего перейти в круговой огонь, т. е. дугу между комплектами щеток разной полярности, эта величина не должна превосходить:

| | |
|---|---|
| для мелких двухполюсных машин . . . . . . . . . | до 80 *в* |
| для нормальных четырехполюсных машин малой и средней мощности . . . . . . . . . . . . . . . | до 35 *в* |
| для быстроходных машин средней мощности . . . | 30 ÷ 35 *в* |
| для крупных машин . . . . . . . . . . . . . . . | 25 ÷ 30 *в* |

Пример 13. Шестиполюсная машина имеет якорь, размеры которого соответствуют примерам 1, 2 и 3, и магнитную систему с размерами соответственно примерам 5, 6 и 8.

Требуется рассчитать ее обмотку якоря для работы в качестве генератора с номинальным напряжением 115 *в* и скоростью вращения $n = 800$ *об/мин* при условии, что якорь имеет продольные вентиляционные каналы.

Для машины подобных размеров можно принять предварительное значение индукции в зазоре $B_в = 8500$ *гс*; тогда магнитный поток будет равен

$$\Phi = B_в Q_в = 8500 \cdot 287 = 2\,440\,000 \ мкс = 2{,}44 \cdot 10^6 \ мкс.$$

После этого может быть определено предварительное число проводников; так как напряжение машины низкое, то наиболее подходящей обмоткой будет простая петлевая с числом пар параллельных ветвей $a = 3$; как было выяснено в примере 9, такая обмотка выполнима на данном якоре. Отсюда

$$N = \frac{60\,Ea \cdot 10^8}{pn\,\Phi} = \frac{60 \cdot 115 \cdot 3 \cdot 10^8}{3 \cdot 800 \cdot 2{,}44 \cdot 10^6} = 354.$$

Это число проводников не делится на число пазов $Z = 63$:

$$\frac{N}{Z} = \frac{354}{63} = 5{,}62 = \text{дробное}.$$

Ближайшее четное число — 6; оно является подходящим для числа проводников в пазу данного якоря, так как число пластин коллектора $K = 189$ требует наличия $u = 3$ сторон секций в каждом слое паза:

$$u = \frac{K}{Z} = \frac{189}{63} = 3.$$

Таким образом, обмотка должна состоять из

$$N = uZ = 6 \cdot 63 = 378$$

проводников; следовательно, исправленное значение магнитного потока будет:

$$\Phi = \frac{60Ea \cdot 10^8}{Npn} = \frac{60 \cdot 115 \cdot 3 \cdot 10^8}{378 \cdot 3 \cdot 800} = 2{,}28 \cdot 10^6 \ мкс.$$

Соответственно этому в отдельных участках магнитной цепи должны быть индукции:

1) в зазоре

$$B_в = \frac{\Phi}{Q_в} = \frac{2,28 \cdot 10^6}{287} = 7940 \ гс;$$

2) в зубцах

$$B_з = \frac{\Phi}{Q_з} = \frac{2,28 \cdot 10^6}{120} = 19\,000 \ гс;$$

3) в теле якоря

$$B_m = \frac{\Phi}{2Q_m} = \frac{2,28 \cdot 10^6}{2 \cdot 203} = 5620 \ гс;$$

4) в сердечниках главных полюсов, полагая коэффициент рассеяния $k_p = 1,2$

$$B_г = \frac{k_p \Phi}{Q_г} = \frac{1,2 \cdot 2,28 \cdot 10^6}{217} = 12\,600 \ гс;$$

5) в станине

$$B_c = \frac{k_p \Phi}{2Q_c} = \frac{1,2 \cdot 2,28 \cdot 10^6}{2 \cdot 120} = 11\,400 \ гс.$$

Таким образом, во всех участках магнитной цепи получаются приемлемые значения индукций.

Проверка величины напряжения между соседними пластинами коллектора дает:

$$e_к = \frac{2p}{K} U \cdot 2 = \frac{6}{189} 115 \cdot 2 = 7,3 \ в,$$

что является вполне допустимым.

## 12. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОБМОТКИ ЯКОРЯ ПРИ МЯГКИХ СЕКЦИЯХ

Когда число проводников и тип обмотки якоря окончательно выбраны, можно перейти к определению сечения проводника.

При полузакрытых пазах обмотка может быть заложена в паз только путем так называемого „всыпания" проводников через узкое отверстие паза, пройдя которое проводники располагаются не в каком-либо определенном порядке, а беспорядочно, местами перекрещиваясь друг с другом и оставляя незаполненные полости. Поэтому для определения размеров сечения проводника нужно обратиться к опытным данным, показывающим, какая часть площади паза может быть использована проводниками.

Ввиду того что полузакрытые пазы всегда невелики по размерам, изоляция их должна быть очень тонкой, а потому на ее изготовление должны применяться высококачественные изоляционные материалы.

Наиболее типичен трехслойный состав изоляции паза, показанный на рис. 49; каждый слой выполняет здесь свое специальное назначение.

Первый слой, самый ближний к стенкам паза, должен защищить содержимое паза от повреждений при укладке; для него применяется тонкий, но прочный электроизоляционный картон, по возможности из сортов так называемого „повышенного качества"; толщина этого слоя берется в среднем около 0,2 *мм*.

В качестве второго слоя применяется тонкая и ровная лакоткань толщиной 0,15—0,20 *мм*; ее механическая прочность невелика, но электрическая—очень значительна; она собственно и является главной изоляцией паза. В самых мелких машинах приходится применять шелковую лакоткань толщиной всего лишь около 0,1 *мм*.

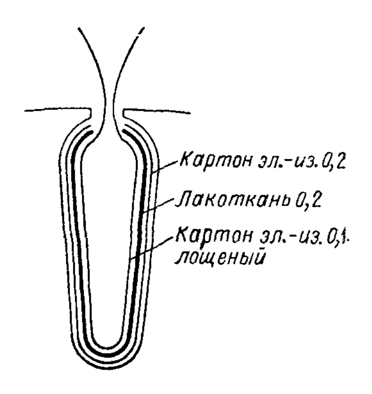


Рис. 49. Изоляция полузакрытого паза

Еще лучшим материалом для этого слоя изоляции является микафолий толщиной 0,25—0,3 *мм*; при чем первый слой изоляции паза может быть взят несколько тоньше, чем при лакоткани.

Наиболее подходящим материалом для третьего, самого внутреннего слоя изоляции паза является гладкий и скользкий лощеный электроизоляционный картон; назначение этого слоя—предохранять лакоткань или микафолий от морщения и задирания изнутри при укладке проводников и их осаживании, способствовать легкому размещению проводников и защищать их изоляцию от обдирания о края паза при прохождении через его отверстие.

Ширина полосы, из которой приготовляется этот слой, берется такой, чтобы оба его края выступали из паза примерно на 10 *мм*, в то время как первые два слоя должны немного не доходить до краев паза. По этой причине последний слой называют „проходной коробкой". Толщина его может быть взята соответственно самому тонкому из имеющихся сортов лощеного электроизоляционного картона, порядка 0,10—0,15 *мм*.

При отсутствии лакоткани можно ограничиться двухслойным составом изоляции, применив для первого слоя электроизоляционный картон толщиной 0,25—0,4 *мм*; но обойтись без проходной коробки крайне трудно.

Можно считать нормальным, чтобы изоляция паза занимала примерно 15—20% его площади; кроме того, около 5% площади отходит на долю прокладки между слоями обмотки и от 10 до 15%—на клин, закрывающий отверстие паза.

Таким образом, на долю обмотки остается примерно 60—70% площади паза. Практика показывает, что проводники со своей изоляцией используют только около половины этой площади; если же считать на чистое сечение меди, то эта доля еще значительно понижается.

Опыт постройки весьма большого количества машин постоянного тока с мягкими секциями свидетельствует, что при обычно применяющейся овальной форме пазов удается занять проводниками с их изоляцией примерно от 0,35 до 0,42 общей площади паза; чем крупнее пазы, тем выше эта часть.

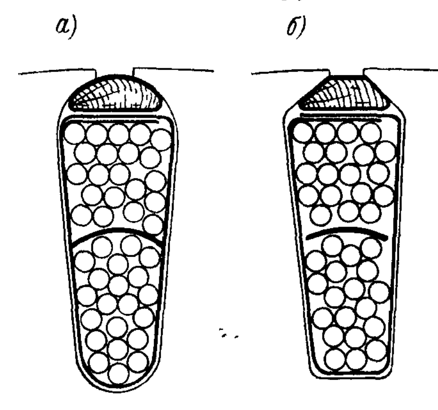


Рис. 50. Всыпная обмотка в полузакрытых пазах

Отношение суммы сечений всех проводников в пазу с их изоляцией к общей площади паза $q_n$ носит название „коэффициента заполнения паза“ $f_n$.

Овальная форма пазов наиболее благоприятна для укладки проводников; в случае, если пазы имеют трапецевидную или прямоугольную форму, углы плохо заполняются проводниками, и значения возможных коэффициентов заполнения должны быть понижены до 0,30—0,37 (рис. 50).

Понятно, что для повышения заполнения паза медью приходится применять обмоточный проводник с изоляцией, как можно более тонкой. Из всех существующих видов изоляции наиболее подходящей для этой цели является органическая эмаль; поэтому проводники с эмалевой изоляцией получили в небольших машинах самое широкое применение.

Эмалевая изоляция очень тонка, мало гигроскопична и весьма теплопроводна; но недостатком ее является относительно невысокая механическая прочность — иногда она довольно легко сцарапывается с поверхности проводника; поэтому проводники с одной эмалевой изоляцией могут применяться для обмотки якорей только при очень высоких механических качествах эмали; в противном случае их необходимо покрывать защитным слоем, например, хлопчатобумажной пряжей.

Наибольшее распространение получил проводник марки ПЭБО. Для очень мелких машин можно рекомендовать применение проводника марки ПЭШО, так как его изоляция примерно в $1^1/_2$ раза тоньше, чем изоляция проводника марки ПЭБО.

В таблице приложения I даны нормальные диаметры проводников круглого сечения; там же указаны площади поперечного сечения их чистой меди.

Эмалированный проводник изготовляется начиная от самых малых диаметров и до диаметров порядка 2 *мм*; выше этого приходится применять проводник марки ПБД. Для мягких секций следует избегать применения диаметров выше 2 *мм*, так как при них „всыпание“ секций в пазы становится крайне затруднительным; если сечение проводника слишком велико, лучше подразделить его на $c = 2 \div 3$ и более соединенных параллельно отдельных проводников.

В каждом пазу находится $N:Z$ проводников, каждый из которых состоит из $c$ сечений; таким образом,

$$f_n = \frac{Ncq'}{Zq_n},$$

где через $q'$ обозначено отдельное сечение с его изоляцией в $мм^2$.

Следовательно, зная площадь паза $q_n$ и задавая подходящее значение коэффициента заполнения, можно получить сечение с его изоляцией:

$$q' = \frac{Zq_n f_n}{Nc} \; [мм^2], \tag{37}$$

откуда его диаметр с изоляцией

$$d' = \sqrt{\frac{4q'}{\pi}} \; [мм]. \tag{38}$$

Пример 14. В пазы якоря из примера 4 требуется уложить обмотку из мягких секций; каждая катушка состоит из трех секций по 7 витков.

Общее число проводников в обоих слоях паза

$$\frac{N}{Z} = 2 \cdot 3 \cdot 7 = 42.$$

При площади паза $q_n = 204{,}7$ $мм^2$ можно принять коэффициент заполнения

$$f_n \approx 0{,}39.$$

Тогда сечение одного проводника с изоляцией будет

$$q' = \frac{Zq_n f_n}{N} = \frac{1}{42} \cdot 204{,}7 \cdot 0{,}39 = 1{,}9 \; мм^2.$$

Это сечение настолько невелико, что нет надобности разбивать его на части, т. е. следует принять $c = 1$; поэтому диаметр проводника с изоляцией будет

$$d' = \sqrt{\frac{4q'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}9}{3{,}14}} = 1{,}56 \; мм.$$

При проводнике марки ПЭБО двухсторонняя толщина изоляции при полученном диаметре проводника согласно таблице Б приложения I будет 0,21 *мм*; следовательно, диаметр проводника без изоляции

$$d = 1{,}56 - 0{,}21 = 1{,}35 \; мм.$$

Как раз такой диаметр имеется в таблице нормальных диаметров круглой обмоточной меди (таблица В приложения I); сечение этого проводника без изоляции

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}35^2}{4} = 1{,}431 \text{ мм}^2.$$

Если бы найденного диаметра $d$ среди нормальных диаметров не оказалось, то пришлось бы выбрать ближайший к нему нормальный диаметр и затем определить для него диаметр с изоляцией $d'$, сечение с изоляцией $q'$ и проверить получающееся при этом новое значение коэффициента заполнения паза $f_n$.

## 13. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОБМОТКИ ЯКОРЯ ПРИ ЖЕСТКИХ СЕКЦИЯХ

При открытых пазах якоря применение мягких секций становится нецелесообразным, так как жесткие секции, изготовляемые отдельно от машины и укладываемые в пазы в совершенно законченном виде, позволяют значительно лучше использовать площадь паза благодаря тому, что в них проводники лежат в строго определенном порядке.

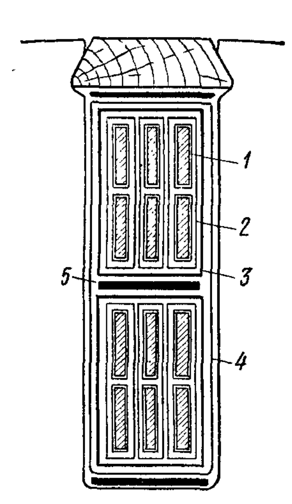


Рис. 51. Виды изоляции пазовой части обмотки

Как правило, жесткие секции наматываются из проводника прямоугольного сечения; но иногда при больших числах витков в секции приходится применять проводник круглого сечения.

В обмотках якорей можно различить следующие виды изоляции (рис. 51).

1. Изоляция витков; обычно ее роль выполняет изоляция проводника, из которого наматываются секции, для чего применяется преимущественно проводник марки ПБД; в последнее время стала входить в употребление также изоляция неорганического происхождения — дельта-асбестон, стеклянная пряжа и т. д. Если же для их изготовления применяется голая медь, то изоляция витков накладывается по всему протяжению полосовыми материалами — хлопчатобумажной лентой, стеклолентой, лаколентой, синтетической пленкой или микалентой.

2. Изоляция секций; в лобовых частях также накладывается полосовыми изоляционными материалами, но в пазовых может быть изготовлена и из листовых материалов — лакированной бумаги, электроизоляционного картона, лакоткани или микафолия. Иногда в пазовых частях вместо нее кладутся только прокладки из картона или миканита.

3. Изоляция катушек в лобовых частях может отсутствовать, в пазовых же выполняется подобно изоляции отдельных секций; если не предусматривается изоляция паза, то изоляция катушки должна иметь наружный слой из механически прочного материала, предохраняющего основную изоляцию от повреждений при укладке в пазы.

4. Изоляция паза применяется не всегда; она выполняется из листовых изоляционных материалов и имеет назначение не только изолировать обмотку от сердечника, но и предохранять ее от повреждений при укладке в пазы в том случае, когда катушка не имеет специального защитного слоя изоляции. Для этого внутренний слой изоляции паза целесообразно изготовлять из лощеного электроизоляционного картона в виде проходной коробки, подобно тому, как было описано выше для обмоток с мягкими секциями.

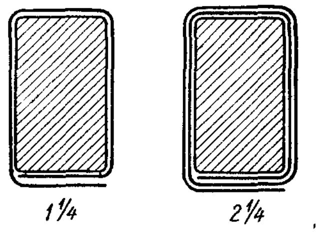


Рис. 52. Наложение изоляции из листовых материалов

5. Прокладки на дно паза, между слоями и поверх обмотки в пазу изготовляются почти исключительно из электроизоляционного картона, нарезанного на полосы соответствующей ширины.

6. Прокладки под бандажи лобовых частей (и пазовых частей, если пазы не имеют клиньев) в большинстве случаев изготовляются из электроизоляционного картона, реже — из миканита, и в этом случае должны прикрываться все же слоем картона.

7. Изоляция обмоткодержателей в зависимости от их конструкции может выполняться из электроизоляционного картона, лакоткани, микафолия или из полосовых изоляционных материалов, если это представляет удобство.

Изоляция из листовых материалов считается наложенной в $1^1/_4$ слоя, в $2^1/_4$ слоя и т. д., если она с трех сторон покрывает изолируемый участок в один, соответственно в два слоя и т. д., а с четвертой стороны — в два, соответственно в три и т. д. слоя (рис. 52).

Изоляция из полосовых материалов может накладываться в один или несколько рядов разными способами:

а) вразбежку — когда витки ленты не примыкают друг к другу, так что между ними остаются свободные промежутки (рис. 53); этот способ применяется только в тех случаях, когда назначение ленты состоит лишь в скреплении прикрытых ею слоев других изоляционных материалов;

б) впритык — когда витки примыкают друг к другу своими краями; этот способ применяется главным образом тогда, когда назначением ленты является защита прикрытых ею слоев изо-

ляции от механических повреждений; односторонняя толщина такой изоляции равна толщине ленты (рис. 54);

в) вполнахлеста — когда каждый следующий виток перекрывает предыдущий ровно до половины ширины; односторонняя толщина такой изоляции равна удвоенной толщине ленты (рис. 55).

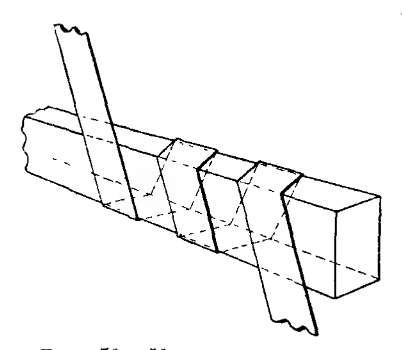


Рис. 53. Наложение изоляции из полосовых материалов вразбежку

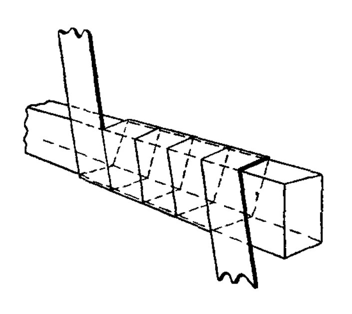


Рис. 54. Наложение изоляции из полосовых материалов впритык

Окончательно изолированные катушки подвергаются пропитке, обусловливающей увеличение толщины или так называемое „разбухание" всех слоев электроизоляционного картона примерно на 5%, а хлопчатобумажной ленты — примерно на 30%.

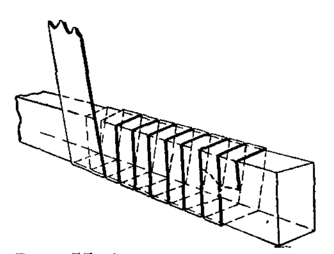


Рис. 55. Наложение изоляции из полосовых материалов вполнахлеста

В приложении III даны образцы изоляции пазовых и лобовых частей обмотки, рекомендуемые для применения; там же указаны толщины, которые должны иметь слои изоляции, а также зазоры, которые необходимо давать как по ширине паза, так и по высоте для возможности вкладывания секций.

При кустарном производстве обмоток нередко применяется замена хлопчатобумажной ленты посредством нарезанной на полоски хлопчатобумажной ткани разных сортов. Такую замену нельзя признать удачной, поскольку изоляция подобного рода очень мало теплопроводна; кроме того, крайне трудно добиться равномерности ее толщины, вследствие чего для укладки в пазы изолированной таким образом обмотки приходится давать очень большие зазоры по ширине и высоте паза.

В крайнем случае, если избежать применения подобной изоляции нельзя из-за отсутствия более подходящих изоляционных материалов, следует при укладке в пазы применять проходные коробки и обязательно предписывать тщательную пропитку катушек.

Когда изоляция всех видов выбрана, расчет сечения проводника обмотки якоря сводится к определению места, которое остается в пазу на долю меди после вычитания из ширины и глубины паза соответствующих суммарных толщин изоляции.

В приложении II дана таблица нормальных размеров обмоточных проводников прямоугольного сечения; там же указаны толщины изоляции проводников различных марок. Площади сечений проводников, указанные в таблице, меньше произведения их сторон, потому что грани проводников не остры, но имеют закругления, так как иначе они легко прорезали бы свою изоляцию.

Рис. 56. Расположение проводников жестких секций в пазу

Проводники жестких секций, имеющие прямоугольное сечение, следует класть более широкой стороной сечения по высоте паза, а более узкой — по ширине, т. е. производить намотку секции стоймя (рис. 56) в отличие от обмоток статоров машин переменного тока, в которых проводники в секциях располагаются всегда плашмя. Желательно избегать проводников с сечениями, форма которых близка к квадрату, так как при намотке секций такие проводники склонны закручиваться, что ведет к высокому браку секций.

При отсутствии проводника подходящего сечения можно применить проводник более мелкого сечения в две и более параллели; они должны располагаться в пазу друг над другом, но не рядом.

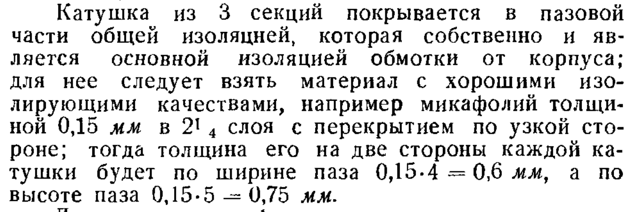
Подразделение сечения необходимо производить во всех тех случаях, когда высота сечения проводника получается больше 10—12 *мм*, так как при этом с одной стороны становится очень затруднительным выгибание головок секций, с другой же значительно возрастают непроизводительные потери энергии от вихревых токов в массе проводников, которые при прочих равных условиях пропорциональны четвертой степени высоты проводника.

Если для обмотки применяется голая медь, целесообразно изолировать части подразделенного сечения друг от друга либо лакировкой проводников, либо помещением между ними бумажной прокладки.

Пример 15. Требуется определить размеры сечения проводника обмотки якоря с 6 проводниками в одном пазу, если паз имеет размеры из

примера 2, число секций в катушке $u = 3$ и номинальное напряжение машины 115 *в*.

Пусть в распоряжении производства изолированного проводника нет, и потому приходится изготовлять обмотку из голой меди; тогда эту последнюю следует изолировать лентой; ввиду низкого напряжения машины можно взять хлопчатобумажную ленту — например миткалевую толщиной 0,15 *мм* и наложить ее на каждый проводник в 1 ряд в $^1/_2$ нахлеста, тогда двухсторонняя толщина изоляции на каждом проводнике будет $0{,}15 \cdot 4 = 0{,}6$ *мм*.



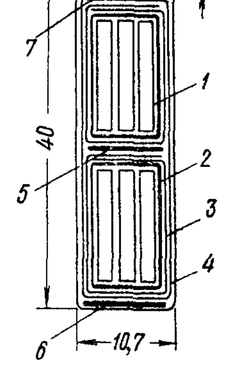



Рис. 57. Эскиз паза к примеру 15

Катушка из 3 секций покрывается в пазовой части общей изоляцией, которая собственно и является основной изоляцией обмотки от корпуса; для нее следует взять материал с хорошими изолирующими качествами, например микафолий толщиной 0,15 *мм* в $2^1/_4$ слоя с перекрытием по узкой стороне; тогда толщина его на две стороны каждой катушки будет по ширине паза $0{,}15 \cdot 4 = 0{,}6$ *мм*, а по высоте паза $0{,}15 \cdot 5 = 0{,}75$ *мм*.

Для защиты микафолия от механических повреждений его следует прикрыть слоем лакированной бумаги, а еще лучше — электроизоляционным картоном толщиной 0,1 *мм* в $1^1/_4$ слоя с перекрытием по узкой стороне, толщина его на две стороны каждой катушки составит по ширине $0{,}1 \cdot 2 = 0{,}2$ *мм*, а по высоте $0{,}1 \cdot 3 = 0{,}3$ *мм*.

Далее нужно предусмотреть выкладку паза из электроизоляционного картона толщиной 0,2 *мм* в $1^1/_4$ слоя с перекрытием по узкой стороне; это дает по ширине паза $0{,}2 \cdot 2 = 0{,}4$ *мм*, а по высоте $0{,}2 \cdot 3 = 0{,}6$ *мм*.

Между слоями обмотки следует положить прокладку из электроизоляционного картона не тоньше 0,4 *мм*.

Наконец необходимо предусмотреть зазор на укладку: по ширине не менее 0,3 *мм*, по высоте не менее 0,4 *мм*.

В результате вся изоляция будет выглядеть так (рис. 57):

| Поз. | Наименование | По ширине, *мм* | По высоте, *мм* |
|---|---|---|---|
| 1 | Изоляция секции — лента миткалевая 0,15 в $^1/_2$ нахлеста 1 ряд . . . . | 1,80 | 1,20 |
| 2 | Изоляция катушки — микафолий 0,15 в $2^1/_4$ слоя . . . . . . . . . . . . . . . . | 0,60 | 1,50 |
| 3 | Изоляция катушки — картон электроизоляционный 0,1 в $1^1/_4$ слоя . . | 0,20 | 0,60 |
| 4 | Изоляция паза — картон электроизоляционный 0,2 в $1^1/_4$ слоя . . | 0,40 | 0,60 |
| 5 | Прокладка между слоями . . . . . . | — | 0,40 |
| 6 | Прокладка на дно паза . . | — | 0,40 |
| 7 | Прокладка под клин . . . . . | — | 0,40 |
| 8 | Зазор на укладку . . . . . | 0,30 | 0,40 |
| | Итого . . | 3,30 | 5,50 |

В примере 2 ширина паза $b_n = 10{,}7$ *мм*; следовательно, на долю меди остается $10{,}7 - 3{,}3 = 7{,}4$ *мм*, а на каждую секцию

$$\frac{7{,}4}{3} = 2{,}46 \text{ мм}.$$

Глубина паза $h_n = 40{,}0$ *мм*, из которых под клин отходит 4,1 *мм*, на медь остается

$$40{,}0 - 4{,}1 - 5{,}5 = 30{,}4 \text{ мм}.$$

Взять проводник с высотой сечения

$$\frac{30{,}4}{2} = 15{,}2 \text{ мм}$$

нельзя; очевидно сечение придется разбивать по высоте на две части по

$$\frac{15{,}2}{2} = 7{,}6 \text{ мм}.$$

Если обратиться к таблице В номинальных размеров прямоугольной обмоточной меди приложения II, то в ней проводника с размерами сечения $2{,}46 \times 7{,}6$ *мм* нет; поэтому придется взять проводник с ближайшими меньшими размерами: $2{,}44 \times 7{,}4$ *мм*. По ширине это дает ничтожную потерю места — всего лишь в $0{,}02 \cdot 3 = 0{,}06$ *мм*; но по высоте потеря достигает $0{,}2 \cdot 4 = 0{,}8$ *мм*.

Этот избыток места может быть заполнен дополнительной прокладкой под клин.

Согласно таблице номинальных размеров, сечение данного проводника составляет $q = 17{,}6$ *мм*$^2$.

## 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ВИТКА ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Каждый виток обмотки якоря состоит из двух пазовых частей, длина которых одинакова для всех витков и равна полной длине сердечника якоря $l_n$, и двух лобовых частей, длина которых для отдельных витков различна.

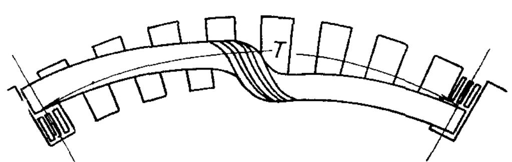



Рис. 58. Определение средней ширины секции

Проводники обмотки якоря, выйдя из паза, не могут сразу же отгибаться для соединения с проводниками противоположной стороны секции; поэтому лобовая часть помимо отогнутого участка всегда состоит еще из двух прямолинейных участков, составляющих продолжение пазовых частей; чем машина крупнее, тем больше длина этих участков.

Что касается отогнутых участков, то их длина зависит от шага обмотки и от размеров якоря. Эту зависимость принято выражать через так называемую „среднюю ширину секции" $T$, под которой понимается длина дуги окружности с центром на

оси якоря между серединами поперечных сечений пазовых частей секции (рис. 58).

Эту окружность можно принять проходящей посередине высоты пазов якоря; таким образом, диаметр ее равен разности между наружным диаметром якоря $D$ и глубиной паза $h_n$; отсюда средняя ширина секции

$$T = \frac{\pi (D - h_n) y_1}{Zu} \ [см]. \tag{39}$$

Опытом постройки весьма большого количества машин постоянного тока установлено, что при мягких секциях длина лобовой части $l_л$ может быть выражена равенством:

$$l_л = K_м T + L \ [см]. \tag{40}$$

Входящая в нее величина $K_м$ берется для двухполюсного якоря равной 1,25, а для четырехполюсного равной 1,30. Применение обмоток из мягких секций при большем числе полюсов крайне мало вероятно.

Что касается величины $L$, то в зависимости от размеров якоря она колеблется от 1 до 3 *см*.

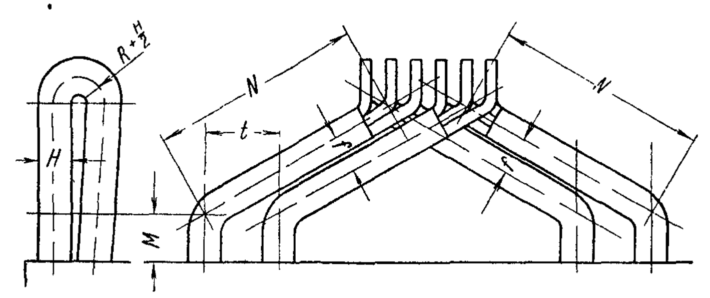


Рис. 59. Определение длины лобовой части жесткой секции

Несколько сложнее обстоит дело в случае жестких секций. Для вычисления длины лобовой части жесткой секции следует разбить ее на участки, длина каждого из которых может быть вычислена отдельно, и просуммировать результаты.

В несколько упрощенном виде таких участков можно различить пять (рис. 59).

1. Два прямолинейных участка с длиной $M$, служащих продолжениями пазовых частей; длина этих участков зависит от того, имеет ли якорь нажимные пальцы зубцов, или их нет; при их отсутствии достаточно принять $M = 1$ *см*, при наличии же пальцев следует взять эту длину с таким расчетом, чтобы между наклонными участками лобовых частей и пальцами нигде не было меньше 1 *см*.

2. Два наклонных участка со средней длиной $N$, которые можно предположить прямолинейными, хотя в действительности они изогнуты по линиям двоякой кривизны —

винтовым линиям на поверхностях конусов, причем углы при вершинах последних для верхнего и нижнего слоев могут быть различны.

При таком предположении их длина может быть принята пропорциональной средней ширине $T$, которая определяется по формуле (39):

$$2N = K_{ж} T \ [см].$$

Величина коэффициента $K_{ж}$ зависит от наклона рассматриваемых участков. Этот наклон может быть охарактеризован отношением наименьших расстояний между осями поперечных сечений двух соседних катушек в наклонных участках и в прямолинейных участках.

Наименьшее расстояние $f$ между осями поперечных сечений в наклонных участках равно сумме действительной ширины поперечного сечения катушки с ее изоляцией и того зазора, который необходим для обеспечения возможности укладки лобовых частей.

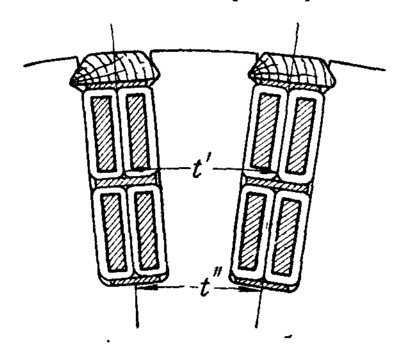


Рис. 60. Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений катушек

Действительная ширина сечения катушки $B$ известна, если выбрана изоляция лобовых частей; она составляется из суммы ширин всех проводников с их изоляцией, лежащих рядом, и двухсторонней толщины общей изоляции катушек с учетом ее разбухания от пропитки.

Что касается зазора между соседними сторонами катушек, то можно рекомендовать брать его из расчета 0,15—0,20 *мм* на каждую секцию, входящую в состав катушки, но не менее 0,3 *мм*.

Таким образом,

$$f = B + (0{,}15 \div 0{,}20)\, u \ [мм], \qquad (41)$$

где $u$ — число секций в катушке.

За наименьшее расстояние $t''$ между осями поперечных сечений катушек в прямолинейных участках для нижнего слоя обмотки можно принять зубцовое деление по дну пазов (рис. 60):

$$t'' = t_2 \ [мм] \ (\text{нижний слой}).$$

Для верхнего слоя можно принять среднее из зубцовых делений по поверхности якоря и по дну пазов:

$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2} \ [мм] \ (\text{верхний слой}).$$

При более точном расчете, когда для правильного построения шаблона, по которому формуются лобовые части, необходимо вычислять длину наклонной части каждого слоя, дальнейший расчет следует вести для верхнего и нижнего слоев в отдельности; но для предварительного расчета достаточно объединить обе формулы в одну:

$$t=\frac{t_1+3t_2}{4}\ [мм]. \qquad (42)$$

Значение коэффициента $K_{ж}$ отыскивается по отношению $f:t$ из табл. 2.

*Таблица 2*

| $f:t$ | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,60 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_{ж}$ | 1,03 | 1,05 | 1,07 | 1,09 | 1,12 | 1,15 | 1,20 | 1,26 |

3. Головка катушки—переход от верхнего слоя к нижнему. Этот участок близок по форме к полувитку винтовой линии; без особой погрешности можно принять его длину равной длине полуокружности, радиус которой равен радиусу закругления внутри головки $R$, сложенному с половиной высоты сечения катушки $H$. Если секции изготовляются из голой меди и изолируются после формования на шаблоне, то радиус закругления внутри головки может быть взят в пределах 0,3—0,5 *см*; но в случае применения изолированного проводника нельзя допустить столь крутое перегибание головки, так как при нем изоляция проводника неизбежно нарушится, и радиус закругления $R$ нужно взять не менее высоты перегибаемых проводников, учитывая при этом, сколько места имеется над обмоткодержателями.

Таким образом, длина этого участка

$$P=\pi\left(R+\frac{H}{2}\right)\ [см].$$

Вся длина лобовой части получается суммированием длин отдельных участков:

$$l_л=2M+2N+P=2M+K_{ж}T+\pi\left(R+\frac{H}{2}\right)\ [см]. \qquad (43)$$

Полная же длина одного витка равна сумме длин двух пазовых и двух лобовых частей:

$$l_в=2(l_п+l_л)\ [см]. \qquad (44)$$

Когда известна длина витка, можно определить сопротивление обмотки якоря $r_я$; оно будет получено умножением

длины витка $l_в$ на число витков в одной параллельной ветви и на удельное сопротивление материала проводника $\rho$, и делением этого произведения на число параллельных ветвей $2a$, число параллельных сечений $c$, входящих в состав витка, и сечение одного проводника $q$. Так как длина витка, найденная по формуле (44), выражена в *см*, в то время как значение удельного сопротивления $\rho$ дается обычно для длины, выраженной в **метрах**, то для получения результата в омах следует еще все разделить на 100.

Число витков в одной параллельной ветви равно общему числу проводников $N$, разделенному на число параллельных ветвей $2a$ и на 2, поскольку каждый виток содержит два проводника; отсюда для сопротивления получается выражение:

$$r_я = \frac{\rho l_в}{2acq100} \frac{N}{2 \cdot 2a} = \frac{\rho l_в N}{200 \cdot (2a)^2 cq} \, [ом].$$

Обмотки якорей машин постоянного тока изготовляются исключительно из меди, для которой удельное сопротивление при температуре 15° С

$$\rho = 0{,}0175 = \frac{1}{57} \, [ом \cdot мм^2/м].$$

Таким образом, сопротивление обмотки при 15° С

$$r_я = \frac{N l_в}{11400 \cdot (2a)^2 cq} \, [ом]. \qquad (45)^*$$

Если обмотка выполняется из проводника круглого сечения, то можно воспользоваться тем, что в таблице *В* приложения I дано сопротивление 1 *км* проводника каждого диаметра при 15° С; если обозначить его через $r$, то сопротивление обмотки можно будет определить по упрощенной формуле:

$$r_я = \frac{N l_в r}{2\,(2a)^2 c \cdot 10^5} \, [ом]. \qquad (45а)$$

Для заказа количества проводника, необходимого для изготовления обмотки, следует знать вес ее меди $G_я$. Он может быть получен как произведение общего числа витков якоря $\frac{N}{2}$ на число параллельных сечении $c$, величину отдельного сечения $q$ $[мм^2]$, длину витка $l_в$ $[см]$ и удельный вес меди $\gamma$. Так как последний дается в $г/см^3$, то для того, чтобы получить вес меди в **килограммах**, следует все разделить на 100 для перевода сечения из $мм^2$ в $см^2$ и на 1000 для перевода из *г* в *кг*; при этом удельный вес меди может быть принят $\gamma = 8{,}9$ $г/см^3$.

Таким образом, вес меди обмотки

$$G_я = \frac{N}{2}\frac{cql_в\gamma}{100\cdot1000} = 8{,}9\,\frac{N}{2}\,cql_в\cdot10^{-5}\ [кг]. \qquad (46)$$

При выполнении обмотки проводником круглого сечения определение веса меди упрощается тем, что в таблице В приложения I дан вес 1 *км* проводника каждого диаметра; если обозначить его через $g$, то вес меди будет определяться по формуле:

$$G_я = \frac{N}{2}\,cl_вg\cdot10^{-5}\ [кг]. \qquad (46)$$

Если для изготовления обмотки должен быть применен изолированный проводник, то следует определить его вес с изоляцией $G'_я$.

В случае применения меди круглого сечения вес меди с изоляцией вне зависимости от марки может быть определен по опытной формуле:

$$G'_я = \left[0{,}876 + 0{,}124\left(\frac{d'}{d}\right)^2\right] G_я\ [кг], \qquad (47)$$

где $d'$ — диаметр проводника с изоляцией, а $d$ — диаметр его без изоляции.

При применении проводника прямоугольного сечения наиболее употребительной марки ПБД для получения веса изолированной меди следует увеличить подсчитанный вес голой меди на 4%:

$$G'_я = 1{,}04\ G_я\ [кг]. \qquad (48)$$

В подсчитанный таким образом вес проводника не входят неизбежные при изготовлении обрезки, расход проводника на пробные укладки и т. п.; поэтому такой вес носит название „веса без надбавки“; необходимые надбавки определяются опытным путем и потому здесь учитываться не будут.

Пример 16. Определить длину витка, сопротивление обмотки и вес проводника для четырехполюсного якоря, паз которого имеет размеры по примеру 4, а данные обмотки соответствуют примерам 10, 12 и 14; наружный диаметр якоря $D = 16$ *см* и полная длина $l_п = 6{,}5$ *см*.

Средняя ширина секции согласно формуле (39) равна:

$$T = \frac{\pi(D - h_п)\,y_1}{Zu} = \frac{3{,}14(16 - 2{,}62)\cdot21}{29\cdot3} = 10{,}15\ см.$$

Данный якорь имеет обмотку из мягких секций; поэтому средняя длина ее лобовой части должна определяться по формуле (40), где следует положить

$$K_м = 1{,}3 \quad и \quad L = 1.$$

Следовательно, средняя длина лобовой части

$$l_л = K_мT + L = 1{,}3\cdot10{,}15 + 1 = 14{,}2\ см$$

и средняя длина витка

$$l_в = 2(l_л + l_п) = 2(14,2 + 6,5) = 41,4 \ см.$$

Так как число пазов якоря здесь $Z = 29$, а в каждом пазу лежит 42 проводника, то полное число проводников

$$N = 29 \cdot 42 = 1218.$$

Поскольку обмотка — простая волновая, число ее параллельных ветвей $2a = 2$; число же параллельных сечений $c = 1$, так как расчетное сечение проводника не раздроблялось на части.

По таблице В приложения I сопротивление 1 *км* проводника с диаметром $d = 1,35$ *мм* составляет $r = 12,01$ *ом*; применяя формулу (45 а), можно получить сопротивление якоря

$$r_я = \frac{N l_в r}{2 \cdot (2a)^2 c \cdot 10^5} = \frac{1218 \cdot 41,4 \cdot 12,01}{2 \cdot 2^2 \cdot 1 \cdot 10^5} = 0,76 \ ом.$$

Вес меди 1 *км* длины данного проводника согласно таблице В приложения I равен $g = 12,73$ *кг*; отсюда вес меди обмотки без изоляции по формуле (46 а):

$$G_я = \frac{N}{2} c l_в g \cdot 10^{-5} = \frac{1218}{2} \cdot 1 \cdot 41,4 \cdot 12,73 \cdot 10^{-5} = 3,2 \ кг.$$

Если марка проводника — ПЭБО, имеющая двухстороннюю толщину изоляции 0,21 *мм*, то диаметр проводника с изоляцией $d' = 1,56$ *мм*, отсюда вес меди с изоляцией по формуле (47)

$$G'_я = \left[0,876 + 0,124\left(\frac{d'}{d}\right)^2\right] G_я = \left[0,876 + 0,124\left(\frac{1,56}{1,35}\right)^2\right] \cdot 3,2 = 3,34 \ кг.$$

Пример 17. Определить длину витка, сопротивление обмотки и вес проводника для шестиполюсного якоря, паз которого имеет размеры по примеру 2, а данные обмотки соответствуют примерам 9, 11, 13 и 15.

Средняя ширина секции по формуле (39)

$$T = \frac{\pi (D - h_п) y_1}{Z u} = \frac{3,14(49 - 4) \cdot 30}{63 \cdot 3} = 22,4 \ см.$$

Так как якорь таких размеров должен иметь нажимные пальцы зубцов высотой по крайней мере в 1 *см* длину одного прямолинейного участка секции следует принять не менее $M = 2$ *см*.

Ширина сечения меди принята 2,44 *мм*; в лобовых частях изоляция секций та же, что и в пазовых, — лента миткалевая 0,15 в $^1/_2$ нахлеста 1 ряд; следовательно, двухсторонняя толщина ее равна 0,6 *мм*, а если учесть разбухание от пропитки, вызывающее увеличение толщины примерно на 30%, то $1,3 \cdot 0,6 = 0,78$ *мм*; общей изоляции катушки в данном случае могут не иметь. Таким образом, при числе секций в катушке $u = 3$ общая ширина сечения катушки составляет

$$B = 3(2,44 + 0,78) = 9,66 \ мм.$$

Отсюда наименьшее расстояние между осями поперечных сечений катушек в наклонных участках лобовых частей по формуле (41):

$$f = B + 0,15u = 9,66 + 0,15 \cdot 3 = 10,1 \ мм.$$

Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений катушек в прямолинейных участках по формуле (42)

$$t = \frac{t_1 + 3t_2}{4} = \frac{2,44 + 3 \cdot 2,04}{4} \cdot 10 = 21,4 \ \text{мм}.$$

Отношение

$$\frac{f}{t} = \frac{10,1}{21,4} = 0,473;$$

согласно таблице 2 § 14 этому соответствует значение коэффициента

$$K_{ж} = 1,13.$$

Так как медь взята голая, радиус закругления внутри головки может быть принят около $R = 0,4$ *см*; секция состоит из $c = 2$ параллельных сечений, расположенных друг над другом, и высота каждого из них равна 7,4 *мм* = 0,74 *см*; следовательно, высота сечения секции с изоляцией

$$H = 2 \cdot 0,74 + 0,06 = 1,54 \ \text{см}.$$

Отсюда полная длина лобовой части по формуле (43)

$$l_л = 2\,M + K_{ж} T + \pi\left(R + \frac{H}{2}\right) =$$

$$= 2 \cdot 2 + 1,13 \cdot 22,4 + 3,14\left(0,4 + \frac{1,54}{2}\right) = 32,9 \ \text{см}.$$

Длина витка

$$l_в = 2(l_п + l_л) = 2\,(19 + 32,9) = \mathbf{103,8} \ \text{см}.$$

Сопротивление обмотки по формуле (45)

$$r_я = \frac{N l_в}{11\,400\,(2a)^2 cq} = \frac{378 \cdot 103,8}{11\,400 \cdot 6^2 \cdot 2 \cdot 17,6} = \mathbf{0,00272} \ \text{ом}.$$

Вес меди по формуле (46)

$$G_я = 8,9 \frac{N}{2} cql_в \cdot 10^{-5} = 8,9\,\frac{378}{2} \cdot 2 \cdot 17,6 \cdot 103,8 \cdot 10^{-5} = \mathbf{61,5} \ \text{кг}.$$

## 15. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ

Полезная мощность, которую способна развить машина, зависит от очень многих обстоятельств; но главным образом от нагревания ее изолированных обмоток во время работы. Именно, если только предел использования данной машины не ставится какими-нибудь иными обстоятельствами, например, искрением щеток на коллекторе (что, вообще говоря, нельзя считать нормальным), то за ее номинальную продолжительную (или кратковременную) мощность можно принять такую, при которой превышения температур обмоток якоря, главных и добавочных полюсов над температурой окружающей среды не превосходят установленных пределов. Подразумевается при этом, что напряжение на зажимах машины и скорость ее вращения имеют номинальные значения и температура окружающей среды не выше некоторой предельной (обычно $+35°$ C).

Когда машина построена, то определение ее номинальной мощности не представляет принципиальных затруднений: испытание под нагрузкой с достаточно тщательно обеспеченным измерением температур обмоток исчерпывающе решает поставленную задачу. Но пока машина еще не существует, пока только производится ее расчет, установление номинальной мощности наталкивается на большие трудности, потому что точное предопределение превышения температуры обмоток во время работы чисто расчетным путем не представляется возможным, в особенности когда это касается относительно небольших машин.

Поэтому остается только прибегнуть к сравнению рассчитываемой машины с данными того огромного опыта, который накоплен практикой постройки больших количеств машин постоянного тока.

Простейшим, хотя и очень приближенным способом такого сравнения является суждение о номинальной мощности машины на основании выбора допустимой плотности тока в обмотке якоря.

Под „плотностью тока" в обмотке якоря $s_я$ понимается частное от деления номинального тока якоря $I$ на число параллельных ветвей $2a$, на число параллельных проводников $c$ и на площадь поперечного сечения проводника обмотки $q$:

$$s_я = \frac{I}{2acq} \; [a/мм^2].$$

Как показывает опыт, величина плотности тока, при которой превышение температуры обмотки достигает установленных пределов, мало зависит от размеров машины, но зато очень сильно — от ряда других обстоятельств:

а) От исполнения машины — она выше у открытых и защищенных машин и ниже у закрытых и герметических.

б) От системы и интенсивности вентиляции — она тем выше, чем больше поток воздуха, охлаждающего машину изнутри или с наружной поверхности, и чем правильнее он распределен по охлаждаемым поверхностям; так как при самовентиляции количество воздуха, прогоняемое вентилятором, примерно пропорционально скорости вращения, то плотность тока у более быстроходной машины может быть допущена более высокой, чем у тихоходной.

в) От рода и количества примененной изоляции — плотность тока может быть тем выше, чем тоньше и теплопроводнее изоляция как пазовых, так и лобовых частей обмотки; поэтому стремление к применению высоких сортов изоляционных материалов, позволяющих уменьшить их толщину и увеличить теплопроводность, оправдывается не только выигрышем места в пазу для увеличения сечения проводников,

но и возможностью повышения допустимой плотности тока; и то и другое ведет к увеличению номинальной мощности.

г) От материала изоляции обмотки; применение изоляционных материалов неорганического происхождения — изделий из слюды, асбеста, стеклянной пряжи и т. д., допускающих более высокие превышения температуры, чем при применении изоляционных материалов органического происхождения, т. е. всякого рода картонов, бумаг, тканей, позволяет повысить допускаемые плотности тока.

Особенно вредное влияние на теплопроводность изоляции оказывает наличие в ней воздушных прослоек, так как теплопроводность воздуха очень низка; поэтому чем лучше пропитаны обмотки, тем выше может быть допустимая плотность тока.

В приложении IV даны значения плотности тока в обмотке якоря, которые могут быть рекомендованы для применения в машинах постоянного тока при различных исполнениях и способах вентиляции в предположении, что изоляция пазовых и лобовых частей соответствует таблицам приложения III и что она достаточно хорошо пропитана.

Выбрав по этим данным плотность тока $s_я$ в соответствии со скоростью вращения и родом исполнения машины, можно определить примерно номинальный ток:

$$I = 2acqs_я, \tag{49}$$

после чего по заданному номинальному напряжению $U$ определяется и электрическая мощность машины

$$P = UI \cdot 10^{-3} \ квт. \tag{50}$$

Нельзя не указать на относительность этих данных; уже сделанные оговорки по поводу изоляции и ее пропитки указывают, что в зависимости от состояния того или иного производства, применяемых материалов и технологии допустимые плотности тока могут быть подвержены более или менее значительным колебаниям, вследствие чего к ним нужно относиться весьма критически; необходимо производить как можно больше опытных проверок результатов их применения путем систематического проведения испытаний выпускаемых машин на нагревание под нагрузкой. Только таким способом можно внести в данные этого приложения те поправки, которые необходимы для согласования их с состоянием производства и его технологии.

Однако, опираясь только на одну плотность тока в обмотке якоря, можно легко впасть в ошибку, в особенности в случае машин очень старого изготовления.

Если сравнить между собой два паза одинаковой формы, но различной величины, заполненные проводниками с одним

и тем же коэффициентом заполнения $f_n$ и нагруженными с одинаковой плотностью тока $s_я$, то при прочих равных условиях (вентиляция и т. д.) содержимое большего паза будет нагреваться сильнее, потому что в нем более затруднен отвод тепла от проводников.

Действительно, при возрастании размеров паза поверхность его стенок, через которые уходит тепло, выделяемое током в проводниках, возрастает пропорционально первой степени размеров; в то же время площадь паза, а вместе с ней и количество выделяемого тепла возрастают пропорционально второй степени размеров. Таким образом, возрастание поверхности охлаждения отстает от возрастания количества выделяемого тепла, и отвод последнего затрудняется, что и ведет к повышению температуры внутри паза.

С другой стороны, если сравнивать между собой пазы одинаковых размеров, то чем теснее они расположены, тем выше при прочих равных условиях будет нагревание их содержимого, так как тем больше количество тепла, выделяемого в одном и том же объеме якоря, имеющего одну и ту же поверхность охлаждения.

По этим причинам целесообразно ввести еще одну характерную величину, позволяющую контролировать правильность выбора плотности тока, конечно, также на основе сравнения с данными опыта постройки большого количества машин.

Эта величина носит название „линейной нагрузки“ и обозначается двойным символом $AS$. Она представляет произведение тока в проводнике на число проводников, приходящееся на 1 *см* длины окружности якоря.

Если последний имеет диаметр $D$, число проводников на нем равно $N$, число параллельных ветвей $2a$ и ток в якоре $I$, то, согласно определению,

$$AS = \frac{NI}{\pi D \cdot 2a}\ [a/см]. \tag{51}$$

Чем машина больше и чем выше ее скорость вращения, тем более высокие значения может принимать линейная нагрузка; подобно плотности тока она тем выше, чем лучше условия вентиляции машины.

В приложении IV приведены помимо плотностей тока также рекомендуемые линейные нагрузки.

Если на машине сохранился ее старый фирменный щиток, то данные этого последнего могут быть использованы для проверки мощности, получающейся при перемотке, не только в том случае, когда ее задачей является восстановление машины по старым данным, но и при изменении последних, например при перемотке на другое напряжение или на другую скорость вращения.

С достаточной степенью точности можно было бы считать, что при изменении скорости вращения внутренняя мощность якоря, а вместе с ней и номинальная мощность машины изменяются пропорционально скорости вращения; однако существует целый ряд причин, нарушающих такую пропорциональность.

Прежде всего следует отметить, что при обмотках из жестких секций число проводников в обмотке якоря очень плохо поддается изменению против первоначальных данных, так как оно связано соотношением между числом пазов и числом пластин коллектора, которое в некоторых случаях даже мешает возможности изменения типа обмотки; так, если якорь первоначально имел волновую обмотку с мертвой секцией, то не может быть применен никакой иной тип обмотки.

Далее, при перемотках, связанных с увеличением номинального тока против первоначальной величины, например, в случае перемотки с уменьшением напряжения при сохранении первоначальной скорости вращения, может оказаться, что размеры коллектора недостаточны для соответствующего усиления щеточного аппарата.

Увеличению скорости вращения против первоначального может быть поставлен предел со стороны недостаточной прочности якоря, коллектора и вентилятора против действия центробежных сил; кроме того, подшипники также могут оказаться не удовлетворяющими требованиям повышенной скорости вращения; впрочем, оба эти обстоятельства определяются конструкцией машины и потому выходят из рамок настоящей книги.

Наконец, даже в том случае, когда машина восстанавливается по первоначальным данным, не всегда можно надеяться на полное восстановление ее номинальной мощности, в особенности когда остатки прежних обмоток не сохранились или когда имеется сомнение в том, что сохранившаяся обмотка действительно относится к первоначальному изготовлению, а не представляет собой неудачную кустарную перемотку, при которой первоначальные данные могли быть более или менее грубо нарушены.

Дело в том, что современные высокоиспользованные машины, в особенности относительно небольших мощностей, являются продуктом кропотливой расчетной и исследовательской работы, в результате которой магнитные и электрические нагрузки их отдельных частей доведены до очень высокой степени, а технология их заводского изготовления, в частности выполнение изоляции и ее пропитки, стоит на уровне, трудно достижимом в обстановке ремонта.

Поэтому даже машины, перемотанные, казалось бы, по вполне первоначальным данным обмоток, с точным соблюдением чисел витков и сечений проводников, не всегда оказы-

ваются способными развить первоначальную номинальную мощность, что иной раз и обнаруживается при испытании таких машин на нагревание; причину этого следует искать прежде всего в несоответствии примененной изоляции и, в особенности, в несовершенстве пропитки (если только не были допущены грубые ошибки конструктивного характера—например применен несоответствующий вентилятор или заглушены вентиляционные каналы или отверстия для входа и выхода вентилирующего воздуха).

Пример 18. Требуется определить примерную номинальную мощность генератора с номинальным напряжением $U = 115$ *в* и номинальной скоростью вращения $n = 800$ *об мин*, если данные обмотки якоря соответствуют примерам 13 и 15, а исполнение машины—открытое с вентиляцией.

Благодаря тому, что заданная скорость вращения при данных размерах машины является не очень высокой, не следует принимать плотность тока в якоре выше примерно $s_я = 4{,}5$ *а*/*мм*²; тогда номинальный ток будет:

$$I = 2acqs_я = 6 \cdot 2 \cdot 17{,}6 \cdot 4{,}5 \approx \mathbf{955}\ a,$$

а электрическая мощность

$$P = \frac{UI}{1000} = \frac{115 \cdot 955}{1000} = \mathbf{110}\ квт.$$

Так как данная машина предназначается для работы в качестве генератора, эта мощность является отдаваемой, полезной мощностью.

При этом токе линейная нагрузка составит

$$AS = \frac{NI}{\pi D \cdot 2a} = \frac{378 \cdot 955}{3{,}14 \cdot 49 \cdot 6} = \mathbf{390}\ а/см,$$

что для машины данной мощности и исполнения согласно приложению IV является вполне приемлемым.

## 16. ОБМОТКИ ГЛАВНЫХ И ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Катушки параллельного или независимого возбуждения главных полюсов мелких и средних машин наматываются изолированным проводником круглого сечения, большею частью марки ПБД; лишь в наиболее мелких машинах используется проводник марки ПЭБО и даже просто ПЭЛ. В крупных машинах при сечении проводника от 6—10 *мм*² и выше применяется проводник прямоугольного сечения, главным образом марки ПБД, однако наряду с ней находят употребление также марки с неорганической изоляцией, как, например, ПДА.

В очень крупных машинах иногда применяются обмотки главных полюсов из голой плоской медной ленты, гнутой на высокое ребро, с прокладками из асбестовой бумаги, подклеенной с одной стороны ленты.

В машинах старого изготовления встречается намотка катушек главных полюсов на металлические каркасы; однако в настоящее время такая конструкция совершенно оставлена, и катушки надеваются на сердечники полюсов, обычно предва-

рительно изолированные электроизоляционным картоном, лакированной бумагой или миканитом.

Сами катушки при этом на углах защищаются от механических повреждений изоляции одним-двумя рядами хлопчатобумажной ленты внахлест.

Практикуемое нередко обматывание катушек лентой по всей поверхности может быть допущено лишь в случае неизолированных сердечников полюсов; при изолированных сердечниках оно не только бесполезно, но и вредно, так как создает излишнее препятствие для охлаждения катушек.

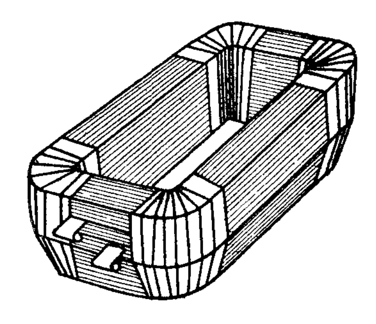


Рис. 61. Катушка главного полюса небольшой машины

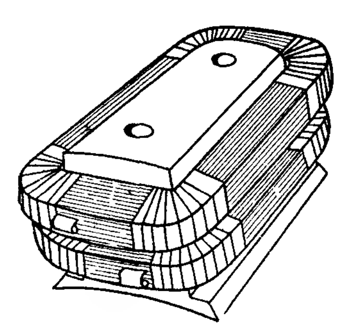


Рис. 62. Подразделенная катушка главного полюса

В относительно небольших машинах катушкам придается конусообразная форма (рис. 61) с таким расчетом, чтобы по возможности лучше использовать промежутки между сердечниками главных и добавочных полюсов; для этого у основания полюса (ближе к станине) намотка производится в большее число слоев, чем у башмака; однако между катушками главных и добавочных полюсов должны оставаться промежутки для прохода охлаждающего воздуха—от 5—6 *мм* в мелких машинах до 12—15 *мм* в более крупных.

В машинах более значительных мощностей—в десятки и сотни киловатт—пространство между главными и добавочными полюсами обычно оказывается вполне достаточным для размещения обмотки на главных полюсах с одинаковым числом слоев по всей высоте катушки; во всяком случае толщина намотки не должна превосходить 45—50 *мм*, так как иначе охлаждение внутренних слоев катушек становится очень затрудненным.

В некоторых случаях в машинах с сильной вентиляцией представляется целесообразным подразделение каждой катушки главных полюсов на несколько частей, имеющих вид плоских катушек с промежутками между ними в 10—12 *мм* (рис. 62).

Исключительно важное значение при изготовлении катушек главных полюсов имеет тщательная их пропитка, которая должна вытеснить воздух из промежутков между отдельными витками для придания катушкам большей теплопроводности.

Обмотки главных полюсов последовательного питания машин со смешанным возбуждением нормально занимают на полюсах не много места, состоя из небольшого числа витков проводника прямоугольного сечения; они располагаются обычно у основания полюса.

У станины и у полюсного башмака на сердечник надеваются изолирующие шайбы; в небольших машинах — из электроизоляционного картона, в более крупных—из гэтинакса или текстолита; иногда они усиливаются шайбами из листовой стали

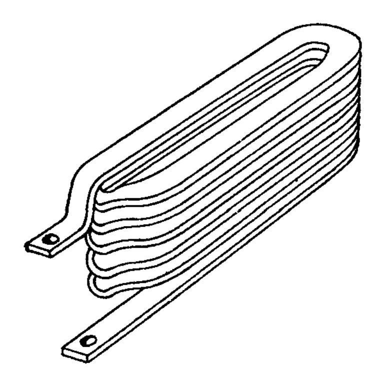


Рис. 63. Катушка добавочного полюса, намотанная на высокое ребро

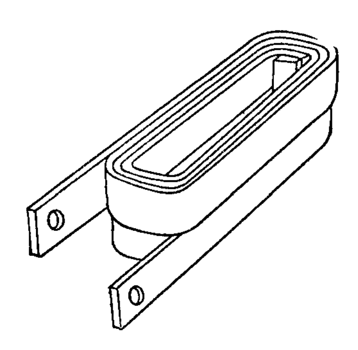


Рис. 64. Катушка добавочного полюса, намотанная плашмя

толщиной 1—2 *мм*. Такие же изолирующие шайбы прокладываются между катушками параллельного и последовательного питания.

Обмотки добавочных полюсов при небольших числах витков на полюс (до 15—20) выполняются из меди прямоугольного сечения в двух разновидностях:

1. Медь изгибается на высокое ребро, и изоляцией между витками служат прокладки или распорки из электроизоляционного картона, гэтинакса, текстолита или даже фанеры (рис. 63).

2. Медь изгибается плашмя, и изоляцией между витками служит электроизоляционный картон или миканит. Обычно при этом катушка подразделяется на две неравные половины, лежащие одна над другой и соединяющиеся между собой двойным перегибом или посредством приклепанной и пропаянной планки, находящейся внутри катушки; при этом начало и конец катушки оказываются снаружи (рис. 64).

При более значительных числах витков катушки добавочных полюсов выполняются проводником прямоугольного сечения марки ПБД, ПБОО или ПДА; а в наиболее мелких машинах при сечении проводника менее 4—5 *мм*²—проводником круглого сечения тех же марок.

## 17. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ГЛАВНЫХ ПОЛЮСОВ

Для того чтобы главные полюса могли создать в машине необходимый для нее магнитный поток, они должны обладать соответствующей намагничивающей силой.

За единицу для измерения намагничивающей силы в электромашиностроении принят ампервиток [*ав*], который представляет собой намагничивающую силу, развиваемую одним витком, когда ток в нем равен одному амперу.

Расчет обмотки главных полюсов определяет количество ампервитков, потребное для поддержания расчетных значений магнитной индукции во всех участках магнитной цепи.

1. Зазор. Если бы якорь был гладким, т. е. не имел пазов, намагничивающая сила для зазора могла бы быть определена по формуле:

$$F_в = 1{,}6 B_в \delta_г \quad [ав],$$

где

$B_в$—расчетное значение индукции в зазоре в *гс* и

$\delta_г$—величина зазора под главными полюсами в *см*.

Но вследствие наличия пазов она должна быть увеличена путем умножения на коэффициент $k_в > 1$, называемый „коэффициентом зазора“ и определяемый по формуле:

$$k_в = \frac{t_1 + 10\delta_г}{t_1 - b_п + 10\delta_г}, \tag{52}$$

где

$t_1$—зубцовое деление по поверхности якоря в *см* и

$b_п$—ширина паза в *см*; в случае полузакрытого паза вместо нее следует поставить ширину отверстия паза $b_0$.

Таким образом, намагничивающая сила для зазора может быть определена по формуле:

$$F_в = 1{,}6 B_в k_в \delta_г [ав]. \tag{53}$$

2. Зубцы якоря. Намагничивающая сила $F_з$, потребная на поддержание в зубцах якоря индукции $B_з$, определяется по формуле:

$$F_з = H_з L_з \quad [ав], \tag{54}$$

где $H_з$—так называемая „напряженность поля“ в зубцах, представляющая количество ампервитков на 1 *см* высоты

зубца при индукции $B_з$, которую следует найти по расчетному значению этой индукции из таблицы Б приложения V, а $L_з$— расчетная толщина слоя зубцов в *см*.

3. Тело якоря. Намагничивающая сила $F_m$ для поддержания в теле якоря индукции $B_m$ может быть определена по формуле:

$$F_m = H_m L_m \ [ав], \quad (55)$$

где $H_m$—напряженность поля в *ав/см*, определяемая согласно индукции $B_m$ по таблице А приложения V, а $L_m$—длина магнитного пути в теле якоря в *см*.

4. Сердечники полюсов. Намагничивающая сила $F_г$, необходимая для поддержания в сердечниках главных полюсов индукции $B_г$, определяется по формуле:

$$F_г = 2H_г h_г \ [ав], \quad (56)$$

где $H_г$—напряженность поля в *ав/см*, которая может быть определена по индукции $B_г$ из таблицы В приложения V, а $h_г$— высота сердечника главного полюса в *см*.

5. Станина. Для определения намагничивающей силы $F_c$, необходимой для поддержания в станине индукции $B_c$, следует пользоваться формулой:

$$F_c = H_c L_c \ [ав], \quad (57)$$

где $H_c$—напряженность поля в *ав/см*; в случае стальной станины ее следует брать в соответствии с индукцией $B_c$ по таблице Г, а в случае чугунной—по таблице Д приложения V; $L_c$—длина среднего волокна станины в *см*.

Полная намагничивающая сила $F$, которой должны обладать главные полюса при холостом ходе машины, получается суммированием всех перечисленных ее слагаемых:

$$F = F_в + F_з + F_m + F_г + F_c \ [ав]. \quad (58)$$

Пример 19. Требуется определить полную намагничивающую силу главных полюсов при холостом ходе генератора, магнитная цепь которого имеет размеры согласно примерам 5, 6 и 8, а якорь согласно примерам 1, 2 и 3, если его номинальные данные соответствуют примерам 13 и 18.

Индукции в различных участках магнитной цепи данного генератора при холостом ходе определены в примере 13; именно:

индукция в зазоре $B_в = 7940$ *гс*,
„ „ зубцах $B_з = 19\,000$ *гс*,
„ „ теле якоря $B_m = 5620$ *гс*,
„ „ сердечнике главного полюса $B_г = 12\,600$ *гс*,
„ „ станине $B_c = 11\,400$ *гс*.

Для определения коэффициента зазора следует учесть, что зубцовое деление $t_1 = 2{,}44$ *см*, ширина паза $b_n = 1{,}07$ *см*, зазор под главными полюсами $\delta_г = 0{,}35$ *см*.

Тогда коэффициент зазора по формуле (52)

$$k_в = \frac{t_1 + 10\delta_г}{t_1 - b_n + 10\delta_г} = \frac{2{,}44 + 10\cdot 0{,}35}{2{,}44 - 1{,}07 + 10\cdot 0{,}35} = 1{,}22.$$

Отсюда намагничивающая сила для зазора по формуле (53)

$$F_в = 1{,}6\, B_в k_в \delta_г = 1{,}6\cdot 7940\cdot 1{,}22\cdot 0{,}35 = 5430 \text{ ав.}$$

Расчетная толщина слоя зубцов ввиду прямоугольной формы пазов равна удвоенной глубине паза:

$$L_з = 2h_n = 2\cdot 4 = 8 \text{ см.}$$

По таблице Б приложения V при индукции 19 000 *гс* напряженность поля для зубцов $H_з = 155$ *ав/см*; таким образом, намагничивающая сила для слоя зубцов по формуле (54)

$$F_з = H_з L_з = 155\cdot 8 = 1240 \text{ ав.}$$

Для индукции в теле якоря $B_m = 5620$ *гс* по таблице А приложения V значение напряженности поля $H_m = 1{,}4$ *ав см*. При длине магнитного пути в теле якоря $L_m = 27$ *см* это дает намагничивающую силу по формуле (55):

$$F_m = H_m L_m = 1{,}4\cdot 27 \approx 38 \text{ ав.}$$

Для сердечников главных полюсов при индукции $B_г = 12600$ *гс* напряженность поля по таблице В приложения V составляет $H_г = 9{,}7$ *ав/см*; по формуле (56) намагничивающая сила для них будет

$$F_г = 2\, H_г h_г = 2\cdot 9{,}7\cdot 13{,}15 = 255 \text{ ав.}$$

Здесь высота сердечника главного полюса $h_г = 13{,}15$ *см* взята по обмеру.

При стальной станине напряженность поля нужно взять из таблицы Г приложения V, где индукции $B_c = 11\,400$ *гс* соответствует $H_c = 11{,}4$ *ав/см*. При длине среднего волокна $L_c = 41{,}4$ *см* это дает по формуле (57) намагничивающую силу

$$F_c = H_c L_c = 11{,}4\cdot 41{,}4 = 473 \text{ ав.}$$

Таким образом, полная намагничивающая сила на пару полюсов по формуле (58) будет:

$$F = F_в + F_з + F_m + F_г + F_c = 5430 + 1240 + 38 + 255 + 473 = \mathbf{7436} \text{ ав.}$$

Для того чтобы на зажимах генератора при его нагрузке было заданное напряжение $U$, необходимо, чтобы электродвижущая сила в якоре $E$ была больше этого напряжения на величину суммы всех падений напряжения в последовательной цепи машины, т. е. в обмотке самого якоря, в контакте щеток на коллекторе, в обмотке добавочных полюсов и в обмотке последовательного возбуждения, если таковая имеется. Падение напряжения в обмотках равно произведению тока якоря $I$ на сумму сопротивлений: обмотки якоря $r_я$, обмотки добавочных полюсов $r_д$ и обмотки последовательного возбуждения $r_c$.

Но сопротивления всех обмоток подсчитываются для их холодного состояния, между тем как при работе машины обмотки нагреты, и потому их сопротивления увеличиваются против холодного состояния на 0,4% на каждый градус сверх 15° С. Обычно средняя рабочая температура машины принимается равной 75° С; следовательно, все сопротивления следует увеличить в $1+0{,}004(75-15)=1{,}24$ раза.

Что касается падения напряжения в контакте щеток на коллекторе, то оно принимается не зависящим от тока и обозначается через $2\Delta U$. Принято считать, что при графитных и угольных щетках $\Delta U=1$ *в*, а при металлических и металло-угольных или металло-графитных $\Delta U=0{,}3$ *в*; впрочем, последние применяются очень редко, только при самых низких напряжениях.

Таким образом, для генератора

$$E=U+1{,}24\,I(r_я+r_с+r_д)+2\Delta U \ [в]. \qquad (59)$$

В двигателе имеет место обратная картина — электродвижущая сила при нагрузке меньше напряжения на зажимах на величину всех этих падений напряжения:

$$E=U-1{,}24\,I(r_я+r_с+r_д)-2\Delta U \ [в]. \qquad (59а)$$

Следствием этого обстоятельства является разница в расчете обмотки главных полюсов генератора и двигателя. В генераторе она должна обеспечить заданную величину напряжения на зажимах не только при холостом ходе, но и при всех нагрузках в пределах номинальной, когда электродвижущая сила, а вместе с ней поток и все значения индукций становятся бóльшими, чем при холостом ходе. Наоборот, в двигателе электродвижущая сила при холостом ходе имеет наибольшее значение, почти равное напряжению на зажимах, так как ввиду малости тока холостого хода падения напряжения невелики; таким образом, если обмотка главных полюсов способна обеспечить необходимый поток при холостом ходе, то при нагрузке она и подавно будет его обеспечивать.

Здесь следует отметить, что все эти рассуждения не распространяются на двигатели с чисто последовательным („сериесным") возбуждением, так как эти двигатели не могут работать без нагрузки.

Таким образом, для генератора следует определить намагничивающую силу главных полюсов не только для холостого хода, но и для нагрузки, заодно проверив, не получаются ли индукции при нагрузке выходящими из рекомендованных пределов, между тем как для двигателя достаточно ограничиться подсчетом намагничивающей силы только для холостого хода.

Если главные полюса генератора имеют только обмотку параллельного („шунтового") или независимого возбуждения

то расчет ее должен производиться по найденному значению намагничивающей силы при нагрузке; если же возбуждение смешанное, т. е. кроме параллельной обмотки предусматривается также и подмагничивающая последовательная, то расчет можно вести по значению намагничивающей силы при холостом ходе как и в случае двигателя; всю разницу намагничивающих сил при нагрузке и холостом ходе должна будет покрыть последовательная обмотка.

Пусть $w_ш$ есть число витков на один полюс обмотки параллельного (или независимого) возбуждения и $i_ш$—ток в ней; тогда принятое для расчета значение намагничивающей силы $F$ может быть представлено так:

$$F = 2w_ш i_ш \ [ав].$$

Это выражение неопределенно, так как порознь ни число витков, ни ток пока неизвестны; для устранения его неопределенности требуются дополнительные соображения.

Сопротивление обмотки параллельного (или независимого) возбуждения в холодном состоянии (т. е. при 15° С) равно произведению удельного сопротивления меди $\rho = 0{,}0175 = \frac{1}{57}$ *ом·мм²/м* на длину проводника в метрах, поделенному на сечение проводника $q$ в *мм²*; длина проводника может быть представлена как произведение числа полюсов $2p$ на число витков на полюс $w_ш$ и на среднюю длину витка $l_в$ в *см*, поделенное на 100 для перевода в метры:

$$r_ш = \frac{2pw_ш l_в}{57 \cdot 100 q_ш} \ [ом]. \tag{60}$$

Отсюда число витков на полюс

$$w_ш = \frac{5700 q_ш r_ш}{2pl_в}.$$

Для того чтобы обмотка могла обеспечить нужное возбуждение машины не только в холодном, но и в нагретом состоянии, падение напряжения на ней должно быть меньше того напряжения, от которого она питается; если это обмотка параллельного возбуждения, то таким напряжением является напряжение на зажимах машины, если же обмотка независимого возбуждения, то им является напряжение источника возбуждения:

$$i_ш r_ш \leqslant k_ш U; \quad r_ш \leqslant \frac{k_ш U}{i_ш} \ [ом].$$

Для генератора с чисто параллельным (или независимым) возбуждением коэффициент запаса $k_ш$ следует взять около 0,6;

для генератора со смешанным возбуждением и для двигателя с параллельным или смешанным возбуждением можно принять $k_ш = 0{,}7$.

Чтобы обмотка возбуждения во время работы машины не перегревалась до недопустимых температур, плотность тока в ней

$$s_ш = \frac{i_ш}{q_ш} \; [а/мм^2]$$

не должна превосходить пределов, установленных практикой; именно, она должна быть ниже плотности тока в обмотке якоря $s_я$ от 2 до 2,5 раз.

Отсюда сечение обмотки

$$q_ш = \frac{i_ш}{s_ш} \; [мм^2].$$

Теперь можно подставить значения $r_ш$ и $q_ш$ в выражение для числа витков на полюс:

$$w_ш = \frac{5700 k_ш U i_ш}{2 p l_в i_ш s_ш} = \frac{5700 k_ш U}{2 p l_в s_ш}. \quad (61)$$

В правой части этого выражения может измениться только величина $s_ш$; все прочие величины являются для данной машины постоянными. Таким образом, число витков на полюс обратно пропорционально выбранной плотности тока.

Для полюсов, сердечники которых имеют прямоугольную форму сечения, средняя длина витка может быть определена из следующих соображений: каждый виток состоит из четырех прямолинейных участков, параллельных сторонам поперечного сечения сердечника полюса, и четырех закруглений на углах.

Промежуток между сердечником полюса и внутренним слоем катушки при обычно применяемых видах изоляции составляет около 0,25 *см* на сторону; следовательно, длина каждого прямолинейного участка на 0,5 *см* больше размера той стороны сечения сердечника полюса, к которой он примыкает.

Четыре закругления на углах составляют полную окружность; если считать, что прямолинейные участки у всех витков одинаковы, то отдельные витки различаются друг от друга только длиной этой окружности. Ее средний диаметр может быть принят равным средней толщине катушки $b_{ср}$, как это видно из рис. 65.

Таким образом, средняя длина витка обмотки параллельного возбуждения может быть определена по формуле:

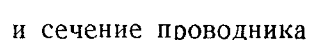
$$l_в = 2(b_г + l_г + 1) + \pi b_{ср} \; [см], \quad (62)$$

где $b_г$ и $l_г$ — ширина и длина сердечника главного полюса в *см*, а $b_{ср}$ — средняя толщина катушки в *см*; эта последняя величина

может быть предварительно определена по эскизу промежутка между главным и добавочным полюсами и во всяком случае не должна быть больше 4,5—5 *см*, иначе охлаждение катушки будет очень затруднено.

После этого могут быть определены: ток возбуждения

$$i_{ш} = \frac{F}{w_{ш}} \ [a] \tag{63}$$



и сечение проводника

$$q_{ш} = \frac{i_{ш}}{s_{ш}} \ [мм^2], \tag{64}$$

откуда его диаметр без изоляции

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4q_{ш}}{\pi}} \ [мм]. \tag{65}$$

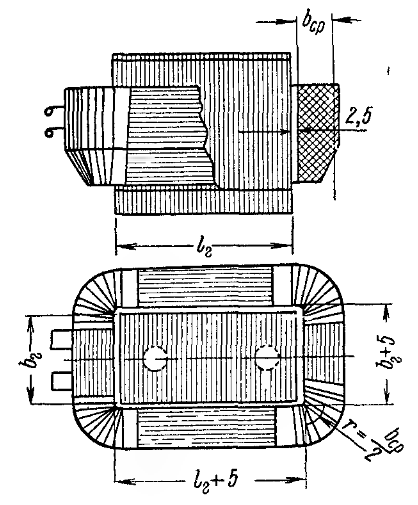



Рис. 65. Определение средней длины витка главного полюса

Выбрав по таблицам приложения I подходящий диаметр проводника и его марку, можно определить диаметр с изоляцией $d'_{ш}$. Остается проверить, достаточно ли места имеется для обмотки в промежутках между главными и добавочными полюсами, для чего следует выяснить, сколько витков по высоте в один ряд может быть уложено на сердечник с учетом толщины изолирующих шайб.

Как бы аккуратно ни производилась намотка катушек, между соседними витками неизбежно будут оставаться зазоры; поэтому число витков в одном ряду может быть получено путем деления 0,95 высоты, занимаемой катушкой, на диаметр проводника с изоляцией $d'_{ш}$.

Число рядов катушки получается после этого делением числа витков в катушке $w_{ш}$ на число витков в одном ряду, а толщина катушки — умножением числа рядов на диаметр проводника с изоляцией.

Рекомендуется после этого еще раз проверить среднюю длину витка, и если нужно, учесть ее исправление при расчете числа витков. В тех случаях, когда сечение проводника получается больше 3—4 *мм*², целесообразно применять проводник прямоугольного сечения с отношением сторон примерно 1 : 2; этим значительно увеличивается плотность намотки и улучшается теплопроводность катушки.

Вес меди обмотки параллельного возбуждения может быть определен по формулам:

для любого сечения

$$G_ш = 8{,}9 \cdot 2pw_ш l_в q_ш \cdot 10^{-5} \ [кг], \qquad (66)$$

для круглого сечения

$$G_ш = 2pw_ш l_в g \cdot 10^{-5} \ [кг], \qquad (67)$$

где $g$—вес 1 *км* проводника данного диаметра по таблице В приложения I.

Вес проводника с изоляцией определяется после этого по формулам (47) и (48).

Если главные полюса снабжаются одной лишь обмоткой последовательного возбуждения, что может быть только в случае двигателя, так как генераторы с последовательным возбуждением нормально не выполняются, расчет очень облегчается тем, что число витков на полюс $w_c$ получается непосредственно из величины намагничивающей силы при нагрузке $F$ путем ее деления на удвоенный номинальный ток $I$:

$$w_c = \frac{F}{2I}, \qquad (68)$$

а величина сечения проводника $q_c$—делением этого тока на заданную плотность тока $s_c$ и на число параллельных ветвей обмотки $a_c$:

$$q_c = \frac{I}{a_c s_c} \ [мм^2]. \qquad (69)$$

Формула для вычисления сопротивления последовательной обмотки ничем принципиально не отличается от формулы (60):

$$r_c = \frac{2pw_c l_в}{5700 a_c^2 q_c} \ [ом]. \qquad (70)$$

Входящая сюда средняя длина витка обмотки $l_в$ в случае чисто последовательного возбуждения определяется так же, как и для обмотки параллельного возбуждения, по формуле (62); но в тех случаях, когда возбуждение смешанное и обмотка последовательного возбуждения занимает только небольшую часть общего места на полюсе, средняя ширина ее катушек может быть значительно меньше, чем у катушек обмотки параллельного возбуждения. Определение веса голого и изолированного проводников производится для обмотки последовательного возбуждения по тем же формулам, что и для обмотки параллельного возбуждения, если только в них произвести соответствующую замену значков при обозначениях величин.

Плотность тока в обмотке последовательного возбуждения может быть выбрана несколько выше, чем в обмотке парал-

лельного возбуждения, так как число слоев ее намотки всегда невелико, а потому теплоотдача лучше.

Применение смешанного возбуждения в генераторах обычно преследует цель поддержания примерно неизменного напряжения при всех нагрузках в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки. Для этого обмотка последовательного возбуждения должна быть включена на подмагничивание и рассчитана так, чтобы создаваемая ею намагничивающая сила была по крайней мере в 1—1,5 раза больше разности между намагничивающими силами при нагрузке и при холостом ходе. Более подробное рассмотрение этого вопроса не умещается, однако, в пределах данной книги.

Пример 20. Требуется рассчитать обмотки параллельного и последовательного возбуждения генератора из предыдущего примера, если задано. чтобы его напряжение при всех изменениях нагрузки оставалось примерно постоянным.

Чтобы определить электродвижущую силу якоря при номинальной нагрузке, необходимо знать сопротивления обмоток якоря, добавочных полюсов и последовательного возбуждения; из них пока известно только первое — в примере 17 оно было найдено равным $r_я = 0{,}00272$ *ом*.

Однако не будет большой ошибкой считать, что сумма сопротивлений обмоток добавочных полюсов и последовательного возбуждения составляет около половины сопротивления обмотки якоря, что обычно очень недалеко от действительности; тогда можно будет положить

$$r_я + r_c + r_д \approx 1{,}5\, r_я = 0{,}0041 \text{ ом}.$$

Хотя заданное напряжение $U = 115$ *в* является и невысоким, однако при нем все же безусловно должны применяться щетки, не содержащие металла; поэтому падение напряжения в контакте щеток на коллекторе следует принять $\Delta U = 1$ *в*.

Отсюда электродвижущая сила при нагрузке с током $I = 955$ *а* согласно формуле (59):

$$E = U + 1{,}24\, I\,(r_я + r_c + r_д) + 2\,\Delta U = 115 + 1{,}24 \cdot 955 \cdot 0{,}0041 + 2 \cdot 1 = 121{,}9 \text{ в}.$$

Теперь следует определить намагничивающую силу на пару полюсов при нагрузке; это сделано в следующей табличке, где индукции увеличены пропорционально отношению электродвижущей силы к напряжению, а напряженности поля найдены по соответствующим таблицам приложения V:

| Участок | Индукция, *гс* | Напряженность поля, *ав/см* | Намагничивающая сила, *ав* |
|---|---|---|---|
| Зазор . . . . . . . . . | 8450 | — | 5770 |
| Зубцы якоря . . . . . | 20200 | 248,0 | 1986 |
| Тело якоря . . . . . . | 5950 | 1,6 | 43 |
| Сердечники полюсов . . | 13400 | 12,4 | 327 |
| Станина . . . . . . . . | 12100 | 13,0 | 539 |
| Всего . . . | | | 8665 |

Разность намагничивающих сил при нагрузке и при холостом ходе составляет:

$$\Delta F = 8665 - 7436 = 1229 \text{ ав}.$$

Эту разность должна покрыть с некоторым избытком обмотка последовательного возбуждения, между тем как намагничивающую силу при холостом ходе должна дать обмотка параллельного возбуждения.

При ширине сердечника полюса $b_г = 12$ *см* и длине его $l_г = 19$ *см* средняя длина витка обмотки параллельного возбуждения (в предположении толщины катушки около $b_{ср} = 3$ *см*) будет согласно формуле (62):

$$l_в = 2(b_г + l_г + 1) + \pi b_{ср} = 2(12 + 19 + 1) + 3{,}14 \cdot 3 = 73{,}5 \text{ см}.$$

Если принять плотность тока $s_ш = 2$ *а мм²*, что в $2^1/_4$ раза меньше плотности тока, принятой в примере 18 для обмотки якоря, и значение коэффициента запаса взять $k_ш = 0{,}6$, то число витков на один полюс согласно формуле (61) будет:

$$w_ш = \frac{5700\, k_ш U}{2 p l_в s_ш} = \frac{5700 \cdot 0{,}6 \cdot 115}{6 \cdot 73{,}5 \cdot 2} = \mathbf{447}.$$

Отсюда ток возбуждения по формуле (63)

$$i_ш = \frac{F}{2 w_ш} = \frac{7436}{2 \cdot 447} = \mathbf{8{,}3} a$$

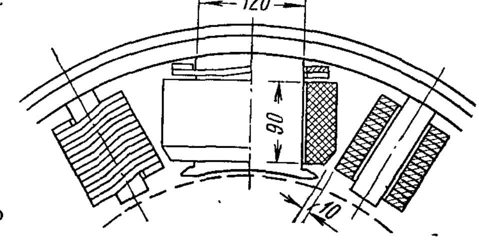



Рис. 66. Эскиз главного полюса к примеру 20

и сечение проводника по формуле (64)

$$q_ш = \frac{i_ш}{s_ш} = \frac{8{,}3}{2} = \mathbf{4{,}15} \text{ мм}^2,$$

что дает диаметр проводника без изоляции по формуле (65)

$$d_ш = \sqrt{\frac{4 q_ш}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4{,}15}{3{,}14}} = 2{,}28 \text{ мм}.$$

По таблице В приложения I имеется близкий диаметр $d = 2{,}26$ *мм*; при марке ПБД его диаметр с изоляцией будет согласно таблице Б того же приложения

$$d' = 2{,}26 + 0{,}33 = 2{,}59 \text{ мм}.$$

Однако сечение $q_ш$ настолько значительно, что есть смысл взять проводник прямоугольного сечения с соотношением сторон около 2; в таблице В приложения II имеется подходящий проводник с размерами $1{,}56 \times 2{,}83$ *мм* и сечением $q = 4{,}20$ *мм²*; при его размерах двухсторонняя толщина изоляции по таблице Б этого приложения равна 0,27 *мм*, так что его размеры с изоляцией будут $1{,}83 \times 3{,}10$ *мм*.

При высоте сердечника полюса $h_г = 13{,}15$ *см* под обмотку можно будет занять высоту около 9 *см*, или 90 *мм* (рис. 66); тогда число витков выбранного проводника в одном слое будет

$$\frac{90 \cdot 0{,}95}{3{,}1} = 27,$$

откуда число слоев

$$\frac{447}{27} = 17.$$

Толщина катушки получается при этом

$$b_{cp} = 17 \cdot 1{,}83 = 31 \text{ мм} = 3{,}1 \text{ см},$$

т. е. очень близкая к предварительно принятой.

Сопротивление этой обмотки по формуле (60)

$$r_ш = \frac{2pw_ш l_в}{5700 q_ш} = \frac{6 \cdot 447 \cdot 73{,}5}{5700 \cdot 4{,}2} = \mathbf{8{,}2} \text{ ом}$$

и вес ее меди без изоляции по формуле (66)

$$G_ш = 8{,}9 \cdot 2pw_ш l_в q_ш \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 6 \cdot 447 \cdot 73{,}5 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-5} = \mathbf{74} \text{ кг}.$$

Число витков на полюс обмотки последовательного возбуждения может быть получено путем деления от однократного до полуторного значения разности намагничивающих сил $\Delta F$ на удвоенный номинальный ток:

$$w_c = \frac{1{,}5\,\Delta F}{2I} = \frac{1{,}5 \cdot 1229}{2 \cdot 955} = \mathbf{1{,}1}.$$

Таким образом, можно принять 1 виток на полюс. Полагая плотность тока в обмотке последовательного возбуждения примерно на 30% выше, чем в обмотке параллельного возбуждения, т. е.

$$s_c \approx 1{,}3 s_ш = 1{,}3 \cdot 2 = 2{,}6 \text{ а/мм}^2,$$

можно получить сечение проводника

$$q_c = \frac{I}{s_c} = \frac{955}{2{,}6} = 367 \text{ мм}^2.$$

Столь крупное сечение неудобно в применении к относительно небольшой машин ; его нужно подразделить по крайней мере на два, взяв, например, полосовую медь $7 \times 25$ *мм* с сечением 175 *мм*², и сделать в обмотке две параллельные ветви с двумя витками на каждом полюсе, но с половиным током.

Длина витка этой обмотки при меди, гнутой на высокое ребро, может быть получена по формуле, аналогичной (73), если вместо средней ширины катушки принять ширину полосы:

$$l_в = 2(b_г + l_г + 1) + \pi b = 2 \cdot (12 + 19 + 1) + 3{,}14 \cdot 2{,}5 = 72 \text{ см}.$$

Тогда ее сопротивление по формуле (70)

$$r_c = \frac{2pw_c l_в}{5700\, a_c^2 q_c} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 72}{5700 \cdot 2^2 \cdot 175} = 0{,}00022 \text{ ом}$$

и вес меди по формуле (66)

$$G_c = 8{,}9 \cdot 2pw_c l_в q_c \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 72 \cdot 175 \cdot 10^{-5} = 13{,}5 \text{ кг}.$$

## 18. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Добавочные полюса оказывают сильнейшее влияние на работу машины постоянного тока. Однако рассмотреть этот вопрос во всей его полноте в данном руководстве не представляется возможным; поэтому приходится ограничиться его приближенным решением, учитывающим опыт постройки большого количества машин постоянного тока.

При ненагруженном якоре, когда проводники его обмотки проходят против середин промежутков между главными полюсами, электродвижущие силы, наведенные в проводниках полем главных полюсов, меняют направление.

Щетки на коллекторе нормально устанавливаются так, чтобы перекрывать пластины коллектора, соединенные с секциями, в которых происходит упомянутое изменение направлений электродвижущих сил. Такое положение щеток называется „нейтральным".

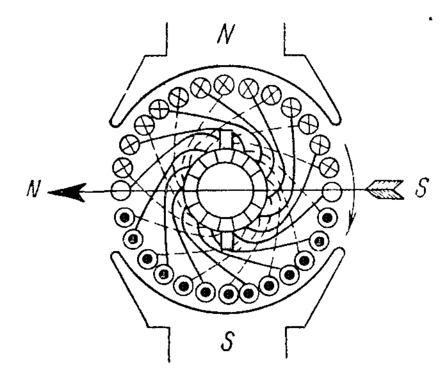


Рис. 67. Поле реакции якоря при щетках в нейтральном положении

Если якорь нагружен током, то при щетках в нейтральном положении направления токов в проводниках, лежащих по разные стороны каждого комплекта щеток, будут противоположны. Таким образом, ось магнитного поля, создаваемого токами в обмотке якоря, или так называемого „поля реакции якоря", будет проходить в середине промежутков между главными полюсами (рис. 67).

На каждом полюсном делении на якоре расположено $\frac{N}{2p}$ проводников; если $I$ есть ток якоря, то при $2a$ параллельных ветвях обмотки в каждом проводнике будет ток $\frac{I}{2a}$ [$a$]. Таким образом, намагничивающая сила реакции якоря на пару полюсов будет равна:

$$F_p = \frac{N}{2p}\frac{I}{2a} \ [ав].$$

Намагничивающая сила добавочных полюсов должна быть направлена навстречу намагничивающей силе реакции якоря и превосходить ее примерно на 25%; если $w_д$ есть число витков на добавочном полюсе и все добавочные полюса включены последовательно, то намагничивающая сила обмотки

добавочных полюсов, рассчитанная на одну пару полюсов, будет:

$$F_{\partial} = 2Iw_{\partial} \approx 1{,}25 \frac{N}{2p} \frac{I}{2a} \ [ав].$$

Отсюда число витков на одном добавочном полюсе при $a_{\partial}$ параллельных ветвях в ней

$$w_{\partial} = \frac{0{,}625Na_{\partial}}{2p \cdot 2a}. \qquad (71)$$

Однако действие добавочных полюсов определяется не величиной их намагничивающей силы, а той индукцией в зазоре, которую они способны создать. Если зазор между добавочными полюсами и якорем слишком велик, эта индукция будет недостаточной, если же он чересчур мал, индукция будет избыточной; и то и другое ведет к неправильности работы щеток на коллекторе, выражающейся в их искрении. А так как искрение, даже на взгляд незначительное, может вызывать порчу поверхности коллектора, ведущую к дальнейшему ухудшению работы щеток, с ним надо всемерно бороться.

Условия работы щеточного аппарата в разных машинах крайне различны; поэтому при перерасчете машины в готовом сердечнике почти никогда нельзя быть заранее уверенным в том, что прежняя величина зазора под добавочными полюсами будет наиболее подходящей и при новых данных машины.

Точное определение наилучшей величины зазора может быть произведено только опытным путем при испытании выполненной машины. Если последнее покажет, что добавочные полюса слишком слабы, их действие можно усилить путем уменьшения зазора, подкладывая между сердечниками добавочных полюсов и станиной прокладки из тонкой листовой стали. Но если окажется, что добавочные полюса слишком сильны, то ослабление их посредством увеличения зазора возможно лишь при условии, что между их сердечниками и станиной имеется некоторый запас стальных прокладок, которые можно по мере надобности удалять; в противном случае придется строгать сердечники, что равносильно почти полной разборке машины. Если высота сердечников добавочных полюсов настолько велика, что не позволяет иметь запаса прокладок, общая толщина которых не менее $^1/_4$ зазора под добавочными полюсами, целесообразно произвести строжку сердечников заблаговременно, до сборки машины.

Прокладкам следует придавать такую форму, которая допускала бы их постановку и удаление без разборки машины. Обычно добавочные полюса крепятся к станине по крайней мере двумя болтами; если прокладки имеют форму, как на рис. 68, *а*, то для изменения зазора следует вывернуть все болты кроме одного, самого крайнего, который можно только

ослабить, и задвигать прокладки со стороны, противоположной этому болту, или удалять их в эту же сторону. Прокладки, имеющие форму рис. 68, *б*, допускают изменение зазора без выворачивания болтов, только посредством их ослабления; но недостатком их является плохой магнитный контакт между сердечником полюса и станиной.

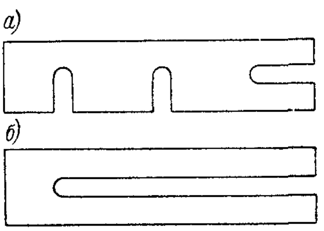



Рис. 68. Прокладки под добавочные полюса

При больших токах, начиная примерно с 400—500 *а*, сечение проводника обмотки добавочных полюсов становится настолько большим, что представляется целесообразным устроить в добавочных полюсах несколько параллельных ветвей. Плотность тока для обмотки добавочных полюсов $s_д$ при изготовлении ее из изолированного проводника или из голого проводника, гнутого плашмя, может быть взята примерно такой же, как и для обмотки последовательного возбуждения главных полюсов; в случае же применения голого проводника, гнутого на высокое ребро, эта плотность тока может быть повышена примерно на 40% против плотности тока для обмотки параллельного возбуждения главных полюсов.

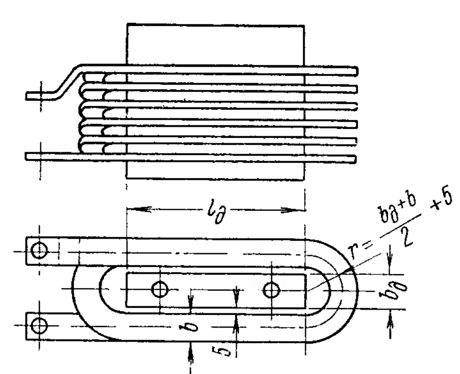



Рис. 69. Определение длины витка добавочного полюса

Сечение проводника обмотки добавочных полюсов определяется тогда по формуле:

$$q_д = \frac{I}{a_д s_д} \; [мм^2], \qquad (72)$$

где $a_д$ — число параллельных ветвей в ней.

При намотке катушек добавочных полюсов из голой меди плашмя или из изолированного проводника для подсчета средней длины витка можно воспользоваться формулой (62), соответственно заменив лишь значки при обозначениях:

$$l_в = 2(b_д + l_д + 1) + \pi b_{ср} \; [см]. \qquad (73)$$

Если же катушки изготовляются из голой меди, гнутой на высокое ребро, то длина витка определяется следующим образом: каждый виток предполагается состоящим из двух прямолинейных участков с длиной, равной длине сердечника добавочного полюса $l_д$, и двух полуокружностей (рис. 69). Так

как промежуток между катушкой и боковыми гранями сердечника составляет обычно около 0,5 *см*, то диаметр этих полуокружностей может быть взят равным ширине сердечника $b_\partial$, увеличенной на 1 *см* и сложенной с шириной медной полосы $b$; отсюда длина витка

$$l_в = 2l_\partial + \pi(b_\partial + b + 1)\ [см]. \qquad (74)$$

После этого сопротивление обмотки может быть подсчитано по формуле, ничем не отличающейся от формулы (70).

Что касается веса обмотки, то он также может быть подсчитан по формулам, ничем не отличающимся от формул (67) и (68).

Пример 21. Сердечники добавочных полюсов имеют ширину $b_\partial = 3{,}5$ *см*, длину $l_\partial = 19$ *см*, высоту $h_\partial = 12{,}8$ *см* (включая запас стальных прокладок); башмаков они не имеют.

Требуется рассчитать их обмотку, если данные машины соответствуют примеру 18.

Число витков на каждом добавочном полюсе по формуле (71)

$$w_\partial = \frac{0{,}625\,N}{2p\cdot 2a} = \frac{0{,}625\cdot 378}{6\cdot 6} = \mathbf{6{,}56}.$$

Принять $6^1/_2$ витков на полюс нельзя по двум причинам: во-первых, конструктивно неудобно, чтобы соединения между добавочными полюсами находились поочередно с разных сторон машины; во-вторых, они при этом оказывали бы влияние на главные полюса, что не всегда желательно. Поэтому можно поступить следующим образом: поместить на каждом полюсе 13 витков, но соединить обмотку добавочных полюсов в $a_\partial = 2$ параллельные ветви, чтобы ток в каждой катушке был вдвое меньше тока якоря.

При таком числе витков на полюс целесообразно применить обмотку из голой полосовой меди, гнутой на высокое ребро; благодаря хорошим условиям охлаждения плотность тока в ней можно взять примерно на 50% выше, чем в обмотке параллельного возбуждения, т. е.

$$s_\partial \approx 1{,}5\,s_ш = 1{,}5\cdot 2 = 3{,}0\ а/мм^2.$$

Отсюда сечение меди по формуле (72)

$$q_\partial = \frac{I}{a_\partial s_\partial} = \frac{955}{2\cdot 3{,}0} = 158\ мм^2.$$

Подходящей будет полосовая медь $7 \times 22$ *мм* с сечением $q = 154$ *мм*$^2$. Длина витка этой обмотки по формуле (74)

$$l_в = 2l_\partial + \pi(b_\partial + b + 1) = 2\cdot 19 + 3{,}14\,(3{,}5 + 2{,}2 + 1) = 59\ см$$

и сопротивление по формуле (70)

$$r_\partial = \frac{2pw_\partial l_в}{5700\,a_\partial^2\,q_\partial} = \frac{6\cdot 13\cdot 59}{5700\cdot 2^2\cdot 154} = \mathbf{0{,}00131}\ ом.$$

Теперь можно проверить, насколько справедлива была предварительно принятая в примере 20 величина общего сопротивления последовательной цепи машины:

сопротивление обмотки якоря . . . . . . . . . $r_я = 0{,}00272$ *ом*

„ „ последовательного возбуждения . . . . . . . $r_c = 0{,}00022$ „

„ „ добавочных полюсов . . $r_д = 0{,}00131$ „

Всего . . . 0,00425 *ом*

Таким образом, подсчитанная величина ничтожно отличается от предварительно принятой 0,0041 *ом*.

Вес меди обмотки добавочных полюсов

$$G_д = 8{,}9 \cdot 2p' w_д l_в q_д \cdot 10^{-5} = 8{,}9 \cdot 6 \cdot 13 \cdot 59 \cdot 154 \cdot 10^{-5} = \mathbf{63} \text{ кг.}$$

## 19. ПРОВЕРКА РАЗМЕРОВ КОЛЛЕКТОРА И ПОДБОР ЩЕТОК

В некоторых случаях может оказаться, что перерассчитанная машина во всех отношениях удовлетворяет предъявленным к ней требованиям: индукции во всех участках магнитной цепи не выходят из пределов рекомендованных, плотности тока во всех обмотках не вызывают сомнений, между катушками главных и добавочных полюсов остаются достаточные промежутки для прохода вентиляционного воздуха и т. д.; но коллектор и щеточный аппарат недостаточны для съема или подвода номинального тока.

Это обычно бывает при перерасчете машины с более высокого напряжения на более низкое или с меньшей скорости вращения на бо́льшую.

В других случаях при испытании перемотанной машины обнаруживается, что, несмотря на вполне достаточные размеры коллектора и щеток, работа их протекает неудовлетворительно: при нагрузке, иногда далеко не доходящей до номинальной, машина начинает искрить, на пластинах коллектора появляется нагар, а в более тяжелых случаях из-под щеток вылетают длинные искры, края щеток и их гибкие проводники накаливаются и даже перегорают. При этом попытки регулирования зазора под добавочными полюсами остаются безуспешными.

Если оставить в стороне возможные неправильности сборки и механические дефекты машины: неправильность расстановки щеток или смещение их с нейтрального положения, неравномерность зазора под добавочными полюсами, неправильность расстановки главных и добавочных полюсов друг относительно друга, ошибки в схемах соединения обмоток полюсов и якоря, вибрацию машины вследствие неуравновешенности или плохой центровки, неспокойную работу щеток по причине плохой обработки коллектора или выступания слюды или отдельных его пластин, то одной из наиболее вероятных причин является несоответствие примененной марки щеток условиям работы машины после перемотки.

Это бывает возможным при перемотке машины с более низкого напряжения на более высокое, если марка щеток оставлена прежней.

По этим причинам в задачу расчета должна входить также проверка пригодности коллектора и щеток новым условиям работы.

Если на каждом щеткодержательном пальце находится $n_щ$ щеток и число пальцев $n_п$ равно числу полюсов $2p$, то на одну полярность приходится половина этого количества; обозначив через $b_щ$ ширину щетки в направлении вращения коллектора и через $l_щ$ ее длину в направлении оси коллектора (рис. 70), можно будет определить общую площадь контакта щеток на одну полярность:

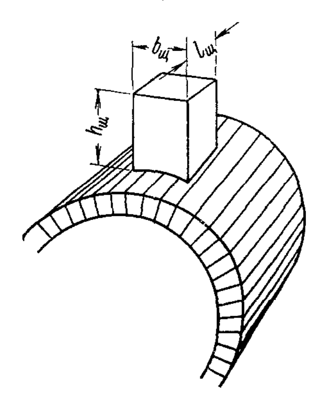


Рис. 70. Размеры щетки

$$Q_щ = \frac{n_п n_щ b_щ l_щ}{2} \quad [см^2].$$

Частное от деления номинального тока машины $I$ на общую площадь контакта щеток одной полярности носит название „плотности тока под щетками":

$$s_щ = \frac{I}{Q_щ} \quad [а/см^2].$$

Таким образом, площадь контакта одной щетки будет:

$$q_щ = \frac{2I}{n_п n_щ s_щ} \quad [см^2]. \qquad (75)$$

От щеток нельзя требовать правильной работы, если плотность тока превосходит предел, допустимый для данной марки.

Допустимая плотность тока для угольных и графитных щеток заключается в довольно узких пределах — от 6 до 12 $а/см^2$, в среднем для наиболее распространенных марок — от 8 до 10 $а/см^2$; для металло-угольных или металло-графитных она значительно выше, до 25 $а/см^2$, а для чисто металлических — даже до 50 $а/см^2$.

Если площадь контакта щеток недостаточна, ее можно увеличить в двух направлениях:

а) Путем увеличения числа щеток на каждом щеткодержательном пальце за счет более тесного расположения щеткодержателей; однако при этом все же не следует ставить щеткодержатели вплотную друг к другу — нужно оставлять между их обоймами зазоры хотя бы порядка 2—3 *мм*. Кроме того, при количестве пальцев более двух необходимо сдвигать щеткодержатели на каждой паре пальцев вдоль оси коллек-

тора так, чтобы их щетки перекрывали промежутки между щетками соседних пар пальцев (рис. 71). В противном случае, если щетки всех пальцев стоят точно друг за другом, коллектор очень скоро примет волнистую поверхность из-за неравномерной сработки. Наконец, необходимо проследить, чтобы при осевом разбеге вала щетки не выходили за края рабочей поверхности коллектора и чтобы щеткодержатели не задевали за петушки обмотки якоря, бандажные кольца коллектора (если они имеются) и т. д.

б) Путем увеличения ширины щеток, требующего замены щеткодержателей на новые. с более широкими обоймами.

Однако в этом направлении нельзя итти особенно далеко, так как если щетка перекрывает одновременно слишком много пластин коллектора, то условия ее работы значительно ухудшаются; во всяком случае не рекомендуется, чтобы щетка перекрывала более $u+1$ пластин, где $u$ — число секций в катушке. Если диаметр коллектора $D_к$, то наибольшая ширина щетки должна удовлетворять условию:

$$b_щ < \frac{\pi D_к}{K} (u+1) \ [см].$$

Кроме того, следует наблюдать, чтобы ширина щетки, пересчитанная с диаметра коллектора на диаметр якоря, не превосходила ширины башмака добавочного полюса:

$$\frac{D}{D_к} b_щ < b'_д \ [см].$$

+
-
+
-
+
-

Рис. 71. Расстановка щеток на коллекторе

Что касается вопроса о подборе марки щеток, то он здесь может быть рассмотрен только в самых общих чертах применительно к ассортименту щеток отечественного изготовления (см. приложение VI).

Стандартизованные технические характеристики щеток различных марок лишь в очень малой степени помогают ориентироваться при выборе марки; из них наиболее характерными и доступными для проверки являются удельное сопротивление и твердость. Как правило, чем щетка тверже, тем выше ее удельное сопротивление и тем меньше допустимая плотность тока; однако между этими тремя показателями нет прямой зависимости.

Щетки, содержащие металл — медно-графитные, бронзографитные, — отличаются очень низким удельным сопротивлением и невысокой твердостью; они могут применяться только при самых низких напряжениях — не выше 12 *в*, и лишь в отдельных случаях до 24 *в*. Применение их при более высоких

напряжениях безусловно недопустимо, так как поведет к неустранимому искрению. Кроме того, отрицательным свойством этих щеток является сильное пыление металлической пылью, быстро ухудшающее изоляцию машины.

Для машин с напряжением до 250 *в* подходящими являются мягкие графитные или так называемые „электрографитированные" щетки с относительно низким удельным сопротивлением и допустимой плотностью тока до 10—12 $а/см^2$. Из отечественных марок такими являются марки Г-3, ЭГ-4.

При более высоких напряжениях — до 500 *в* — предпочтение следует отдать более твердым маркам с допустимой плотностью тока 8—10 $а/см^2$, как марки Г-2 и ЭГ-2. При еще более высоких напряжениях — до 750 *в*, а также при больших окружных скоростях на коллекторе и при тяжелых условиях работы щеток нужно выбирать наиболее твердые марки с высоким удельным сопротивлением, преимущественно электрографитированные, которые также допускают плотности тока до 10 $а/см^2$, как, например, марки ЭГ-8 и ЭГ-14.

Пример 22. Коллектор шестиполюсного генератора с номинальными данными: 100 *квт*, 115 *в*, 955 *а*, 800 *об/мин* имеет следующие размеры: диаметр $D_к = 40$ *см*, длина рабочей части $l_к = 20$ *см*, число пластин $K = 189$. Щетки и щеткодержатели отсутствуют и их требуется подобрать заново; ширина добавочного полюса $b_д = 3{,}5$ *см*.

Для распространенного размера щеток в направлении оси коллектора $l_щ = 30$ *мм* = 3 *см* наружный размер обоймы щеткодержателя будет не менее 35 *мм*. Зазор между обоймами следует взять около 5 *мм*; таким образом, на один щеткодержатель с промежутком приходится 40 *мм*.

Так как шестиполюсная машина имеет $n_п = 6$ щеткодержательных пальцев, щетки на соседних парах пальцев должны быть смещены друг по отношению к другу примерно на $^1/_3$ от 40 *мм*, т. е. около 12,5 *мм*; это удлиняет полосу, занятую щеткодержателями, на 25 *мм*. Кроме того, с обеих сторон следует иметь запас на осевую игру вала примерно по 10 *мм*.

Если от рабочей длины коллектора $l_к$ отнять эти надбавки, то результат деления остатка на длину, занимаемую одним щеткодержателем, даст число щеткодержателей на одном пальце:

$$200 - 2 \cdot 12{,}5 - 2 \cdot 10 = 155 \text{ мм},$$

$$n_щ = \frac{155}{40} = 3{,}88 \approx 4.$$

Таким образом, всего на одну полярность $3 \cdot 4 = 12$ щеткодержателей.

Так как напряжение машины низкое и скорость вращения невелика, можно выбрать мягкие электрографитированные щетки марки ЭГ-4; хотя для этой марки допустимая плотность тока составляет 12 $а/см^2$, лучше все же принять несколько меньше: $s_щ = 10$ $а/см^2$; тогда по формуле (75) площадь контакта щетки должна быть

$$q_щ = \frac{2 \cdot I}{n_п n_щ s_щ} = \frac{2 \cdot 955}{6 \cdot 4 \cdot 10} = 7{,}95 \text{ см}^2.$$

Деление площади контакта щетки на ее размер в осевом направлении $l_щ$ дает ширину щетки:

$$b_щ = \frac{q_щ}{l_щ} = \frac{7,95}{3,0} = 2,64 \text{ см} = 26,4 \text{ мм}.$$

Очевидно, придется принять $b_щ = 25$ *мм*.

Предельно допустимая ширина щетки для данного коллектора составляет согласно формуле (76)

$$\frac{\pi D_к}{K}(u+1) = \frac{3,14 \cdot 40}{189}(3+1) = 2,66 \text{ см};$$

таким образом, выбранная ширина щетки по этому признаку является удовлетворительной; предельно допустимая ширина щетки для данных добавочных полюсов по формуле (77)

$$\frac{D}{D_к} b_щ = \frac{49 \cdot 2.5}{40} = 3,07 \text{ см} < b_д;$$

следовательно, и по этому признаку выбор размеров щетки следует признать удачным.

Таким образом, выбраны щетки марки ЭГ-4 размером $25 \times 30$ *мм*.

## 20. СЛУЧАИ ЧАСТИЧНОЙ ПЕРЕМОТКИ

Изложенный выше расчет машины постоянного тока предусматривает полную перемотку машины, что соответствует случаям 4 и 5, приведенным в § 1. Однако далеко не всегда приходится перематывать всю машину целиком; так, в случаях 2 и 3 того же § 1 иногда удается ограничиться только частичной перемоткой или даже переключением существующих обмоток.

Наиболее сложной и трудоемкой является перемотка якоря; имея готовые сердечник якоря и коллектор с заданными числами пазов и пластин, нередко бывает чрезвычайно трудно произвести какое-нибудь изменение обмотки, в особенности когда дело касается машин средних и крупных мощностей, имеющих одновитковые жесткие секции. Изменение числа проводников в одной параллельной ветви для таких якорей возможно только грубыми скачками; так, например, если якорь имеет волновую обмотку с мертвой секцией, можно удвоить или вообще увеличить в какое-нибудь небольшое целое число раз число проводников в одной параллельной ветви, применив многовитковые секции; уменьшить же его в случае одновитковых секций без изменения типа обмотки нельзя.

Прежде всего представляют интерес те случаи, когда обмотка якоря может быть оставлена без изменений. Для получения от машины по возможности большей мощности следует стремиться к тому, чтобы при всех изменениях и переделках магнитный поток, а вместе с ним и индукции во всех участках

магнитной цепи оставались на одном и том же уровне. Действительно, если машина правильно рассчитана, то всякое понижение магнитного потока поведет к ухудшению ее использования; что же касается увеличения потока, то на него можно рассчитывать только в очень небольшой степени — пока индукции остаются в рекомендованных пределах, иначе ток возбуждения начнет быстро возрастать, что вызовет перегрев обмотки главных полюсов.

На этом основании единственным случаем, когда можно сохранить без изменений обмотку якоря, является одновременное увеличение или уменьшение скорости вращения и напряжения так, чтобы они оставались примерно в одном и том же отношении.

Условия вентиляции якоря улучшаются с повышением скорости вращения, что позволяет несколько увеличить допустимую плотность тока; так, можно считать, что при удвоении скорости вращения номинальный ток якоря машины открытого и защищенного исполнения с самовентиляцией может быть повышен на 20—25%; но при закрытом или герметическом исполнении допустимая плотность тока практически не зависит от скорости вращения. Стандартные напряжения машин общего назначения находятся в простых соотношениях друг с другом: для двигателей — 110, 220 и 440 *в*, для генераторов — 115, 230 и 460 *в*; благодаря этому при изменении напряжения с сохранением скорости вращения часто приходится встречаться с необходимостью удвоения числа проводников в одной параллельной ветви (при переходе от меньшего напряжения к вдвое большему) или уменьшения его вдвое (при переходе от большего напряжения к вдвое меньшему).

Равным образом при увеличении или уменьшении в любое целое число раз скорости вращения с сохранением напряжения число проводников в параллельной ветви должно быть уменьшено или увеличено в это же число раз.

Наконец, при одновременном изменении и скорости вращения и напряжения, когда отношение напряжения к скорости вращения изменяется в целое число раз, число проводников в параллельной ветви требует увеличения или уменьшения в это число раз.

То и другое может быть в ряде случаев осуществлено без перемотки якоря лишь за счет изменения типа обмотки посредством перепайки ее соединений с коллектором, при котором изменяется число параллельных ветвей.

Если исходная обмотка — простая петлевая, то для удвоения числа параллельных ветвей может быть применен переход к сложной петлевой обмотке; при четном числе секций и пластин коллектора — к двукратно-замкнутой, а при нечетном их числе — к однократно-замкнутой двухходовой. Вследствие сложности уравнительных соединений первая из них применяется

крайне редко, что уже отмечалось в § 5 при описании этой обмотки. Поэтому в тех случаях, когда число секций в катушке также четно, вместо применения двукратно-замкнутой петлевой обмотки можно поступить следующим образом: соединения обмотки с коллектором перепаиваются так, как если бы предполагалось применить двукратно-замкнутую петлевую обмотку, т. е. полный шаг всех секций берется $y=2$; затем пластины коллектора, к которым присоединены секции, лежащие в одних и тех же пазах, попарно соединяются перемычками в петушках. В результате обмотка продолжает оставаться простой петлевой, но с вдвое меньшим числом секций и пластин коллектора, потому что наглухо соединенные между собой две соседние секции и две пластины коллектора можно рассматривать как одну.

Однако при ступенчатых обмотках этот способ не может быть применен, так как при нем оказались бы наглухо соединенными между собой секции разной ширины, что вызвало бы возникновение в них больших уравнительных токов.

Если же исходная обмотка — простая волновая, то удвоение числа параллельных ветвей возможно в общем случае путем перехода к двукратно-замкнутой волновой обмотке при условии, что число секций четно и его половина удовлетворяет условию (23).

В частности, в небольших четырехполюсных машинах с простой волновой обмоткой из мягких проволочных секций возможен переход к простой петлевой обмотке; однако в последней нельзя применить уравнительные соединения, так как она не будет симметричной. Поэтому такой переход может быть допущен только в самых небольших машинах — не свыше 2—3 *квт*.

При переходе от меньшего числа проводников в параллельной ветви к вдвое большему должно уменьшиться вдвое число параллельных ветвей.

Если исходная обмотка — простая петлевая или простая волновая, то уменьшение числа параллельных ветвей в общем случае невозможно; в частности же, для небольших четырехполюсных машин с простой петлевой обмоткой из мягких секций при нечетном их числе возможен переход к простой волновой обмотке.

Если исходная обмотка принадлежит к одному из сложных типов, то переход к соответствующему простому типу всегда возможен.

Во всех перечисленных случаях переключения обмоток якорей требуется снятие бандажей с лобовых частей со стороны коллектора и выпаивание концов секций из петушков коллектора, если обмотка состоит из жестких секций, или непосредственно из пластин коллектора, если обмотка выполнена мягкими секциями. После этого лобовые части перегибаются

в соответствии с изменением шага обмотки, а в случае мягких секций, при которых производится еще и изменение типа обмотки, — в соответствии с изменением формы секций (рис. 72).

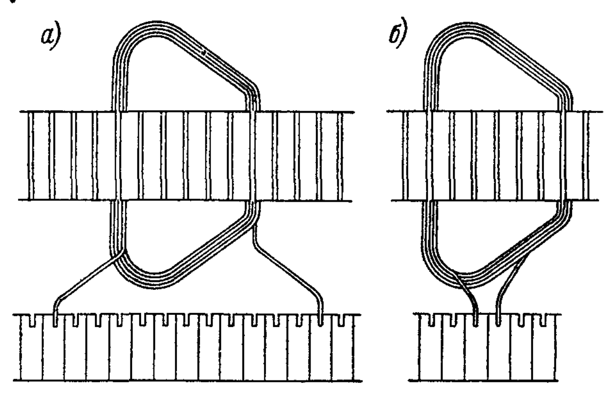



Рис. 72. Пересоединение волновой обмотки в петлевую при мягких секциях

Следует отметить один частный случай, в котором переход от меньшего числа проводников в параллельной ветви к большему в целое число раз может быть произведен без изменения типа обмотки. Именно, в якорях с мягкими секциями, намотанными с подразделением каждого проводника на такое число *c* одинаковых параллельных сечений, которое кратно отношению большего числа проводников к меньшему, может быть применено увеличение числа витков в каждой секции путем уменьшения числа параллельных сечений; для этого начала и концы всех секций должны быть отпаяны от пластин коллектора, после чего следует при помощи индуктора или лампы определить „свои“ концы каждого из отдельных проводников и пересоединить их так, как показано на рис. 73 для примера двухвитковой секции с двумя параллельными сечениями, превращаемой в четырехвитковую секцию с последовательным соединением четырех витков.

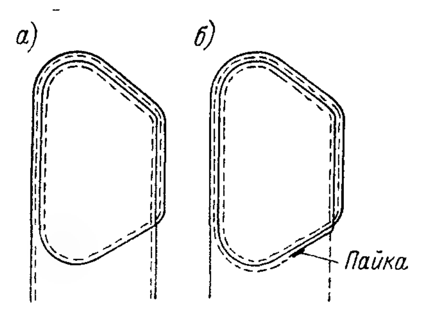



Рис. 73. Последовательное соединение параллельных сечений проводника

Обратная операция — уменьшение числа витков в секции за счет увеличения числа параллельных сечений — в готовом якоре едва ли представляется возможной.

Обмотка параллельного возбуждения главных полюсов может быть оставлена без изменений во всех случаях переделки, когда сохраняется напряжение; действительно, на сколько-нибудь существенное увеличение магнитного потока в правильно рассчитанной машине надеяться не приходится, уменьшение же потока может быть осуществлено введением в цепь обмотки соответствующего реостата.

Если же напряжение изменяется, то для сохранения величины магнитного потока следует изменить число витков и сечение проводника из условий:

$$w' = \frac{U'}{U} w, \tag{78}$$

$$q' = \frac{U}{U'} q \ [мм^2],$$

где

$w$ и $w'$ — исходное и требуемое числа витков;

$q$ и $q'$ — исходное и требуемое сечения;

$U$ и $U'$ — исходное и требуемое напряжения.

В частности, если производится переход от большего напряжения к вдвое меньшему, что представляет один из наиболее частых случаев, обмотка параллельного возбуждения главных полюсов может быть сохранена; достаточно лишь удвоить в ней число параллельных ветвей. Так как число главных полюсов всегда четно, такое удвоение не представляет для их обмоток никаких затруднений; единственное требование при этом — не включать в состав каждой параллельной ветви катушки рядом лежащих полюсов, но образовать одну параллельную ветвь из катушек нечетных полюсов, а другую — из катушек четных полюсов.

Тогда каждая параллельная ветвь будет состоять из катушек, расположенных по всей окружности машины, и возможная неравномерность распределения тока между параллельными ветвями не будет вызывать неравномерности магнитного поля машины.

Равным образом в случае надобности может быть применено соединение катушек обмотки параллельного возбуждения в три, четыре и т. д. параллельные группы при условии, что число полюсов кратно числу требуемых параллельных ветвей; во всех случаях катушки каждой группы должны быть равномерно распределены по окружности машины.

Переход от меньшего напряжения к вдвое большему без перемотки катушек обмотки параллельного возбуждения возможен только тогда, когда при исходном напряжении эта обмотка имеет параллельные ветви, что встречается очень редко.

Однако для небольших машин можно допустить сохранение этой обмотки за счет включения в ее цепь нерегулируемого сопротивления, равного примерно сопротивлению обмотки при 75° С; хотя это и неэкономично, так как удваивает потери на возбуждение машины, но в крайнем случае, например, если отсутствует подходящий проводник, может быть допущено как временное мероприятие.

Обмотка последовательного возбуждения главных полюсов и обмотка добавочных полюсов сохраняются без изменения во всех тех случаях, когда обмотка якоря остается неизменной; если же последняя изменяется, то вместе с ней должны быть изменены и обе эти обмотки согласно условиям:

$$w' = \frac{I}{I'} w, \tag{79}$$

$$q' = \frac{I'}{I} q \ [мм^2],$$

где $I$ и $I'$ — исходный и требуемый токи якоря.

Если якорь не перематывается, а в нем только производится изменение числа параллельных ветвей, то эти условия могут быть заменены следующими:

$$w' = \frac{a}{a'} w, \tag{79a}$$

$$q' = \frac{a'}{a} q \ [мм^2],$$

где $a$ и $a'$ — исходное и требуемое числа пар параллельных ветвей якоря.

Переключение катушек обмоток последовательного возбуждения и добавочных полюсов в параллельные группы возможно в том случае, когда они имеют на всех полюсах одинаковые и притом целые числа витков, и производится так же, как было описано для катушек обмотки параллельного возбуждения. Если же катушки имеют неодинаковые или дробные числа витков с расположением выводов с разных сторон машины, применять параллельные соединения нельзя.

Применение параллельного соединения этих обмоток встречается довольно часто, поэтому случай, когда имеется возможность переключения с уменьшением числа параллельных ветвей (например, последовательное соединение всех катушек вместо соединения в две параллельные группы), является нередким.

Нужно избегать параллельного соединения катушек всех полюсов; но если никакое иное решение невозможно (например, из-за отсутствия подходящего проводника для перемотки),

следует применить схему соединений, показанную на рис. 74, которая обеспечивает приблизительно равномерное распределение тока между катушками. Если же сопротивления отдельных катушек настолько малы, что имеют один порядок с сопротивлениями соединительных проводников между ними, то и к такой схеме прибегать не следует.

При переделках всякого рода следует учитывать те обстоятельства, которые могут ограничивать изменение той или иной величины.

Так, при понижении напряжения машины необходимо производить проверку, способен ли коллектор обеспечить съем

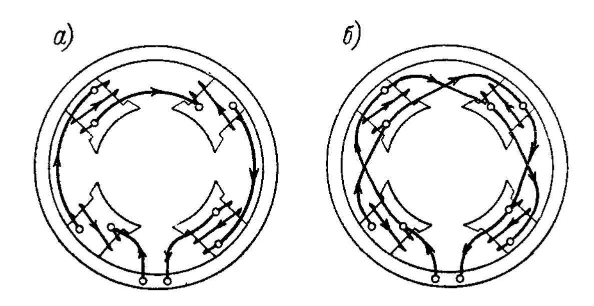


Рис. 74. Параллельное соединение катушек всех полюсов

возросшего тока; если в машинах малых мощностей этот вопрос обычно не играет существенной роли, то в машинах средних, а тем более крупных мощностей он является первоочередным.

Наоборот, при повышении напряжения число пластин на полюс может оказаться недостаточным, и значение напряжения между соседними пластинами превзойдет допустимые пределы.

Увеличение скорости вращения двигателя путем понижения магнитного потока практически почти ничем не ограничено, кроме его механической прочности: напротив, для генератора с параллельным возбуждением понижение магнитного потока без перемотки якоря недопустимо, так как при этом его напряжение становится неустойчивым.

При увеличении скорости вращения особое значение приобретают вопросы прочности; может оказаться, что имеющиеся в машине вращающиеся детали — коллектор, сердечник якоря, вентилятор — обладают недостаточной прочностью при возросших центробежных силах; это касается преимущественно проволочных бандажей на лобовых (а иногда и на пазовых) частях обмотки якоря.

Вопросу о расчете проволочных бандажей посвящен § 21; что касается прочих деталей, то расчетная проверка их механической прочности выходит из пределов данной книги, поэтому приходится в данном случае ограничиться только самыми общими соображениями.

Нормальные машины малых и средних мощностей обычно выполняются в механическом отношении совершенно одинаково при всех применяемых скоростях вращения; достаточно ясное представление о пределах последних в зависимости от мощности дает приведенная в приложении VII таблица основных данных нормальных двигателей постоянного тока всесоюзной серии ПН.

Кроме того, по отдельным деталям должны быть учтены следующие соображения.

Коллектор. В быстроходных машинах применяются массивные бандажные кольца, насаженные на коллектор в горячем состоянии; коллекторы без бандажных колец могут применяться для скоростей вращения до 3000 *об/мин* при диаметрах примерно до 150 *мм*, 2000 *об/мин* при диаметрах до 250 *мм* и 1500 *об/мин* при диаметрах до 400 *мм*.

Сердечник якоря. При наружном диаметре не свыше 500 *мм* могут быть допущёны скорости вращения до 3000 *об/мин* и при диаметре не свыше 750 *мм* — до 2000 *об/мин*.

Вентилятор. При диаметрах свыше 300 *мм* вентиляторы, предназначенные для работы со скоростями вращения до 3000 *об/мин*, должны отличаться солидной конструкцией, в частности, надежным креплением лопаток несколькими заклепками с каждого конца лопатки; диски и кольца должны быть точеными по всем поверхностям.

Подшипники скольжения. Обычно применяемая кольцевая смазка обеспечивает работу подшипников машин средних мощностей до 2000 *об/мин*, машин крупных — до 1000 *об/мин*; при более высоких скоростях вращения применяется принудительная смазка — под давлением от специального насоса или напорного бака, или при помощи дисковых насосов, сидящих непосредственно внутри камеры подшипника.

Подшипники качения. В мелких машинах шариковые подшипники применяются при всех скоростях вращения; в машинах средних мощностей возможность применения шариковых и роликовых подшипников сильно ограничивается малой их устойчивостью против износа при повышенных скоростях вращения.

Пример 23. Шестиполюсный генератор с номинальным напряжением $U = 115$ *в* и номинальной скоростью вращения $n = 800$ *об/мин* имеет обмотку якоря, соответствующую данным примера 9, и обмотки главных и добавочных полюсов, соответствующие данным примеров 20 и 21. Требуется определить возможность его переделки:

а) в генератор с напряжением $U' = 230$ *в* при сохранении скорости вращения;

б) в двигатель с напряжением $U' = 220$ *в* при скорости вращения $n' = 1500$ *об/мин*.

Удвоение напряжения генератора при сохранении скорости вращения требует увеличения вдвое числа проводников в одной параллельной ветви якоря, что без перемотки могло бы быть достигнуто только уменьшением вдвое числа параллельных ветвей; но так как данный якорь имеет простую петлевую обмотку с нечетным числом пар параллельных ветвей, равным числу пар полюсов, т. е. 3, уменьшение его вдвое без перемотки не представляется возможным; поэтому одним решением является перемотка по прежней схеме, но с применением двухвитковых секций вместо одновитковых, вторым же — переход на волновую обмотку с трехвитковыми секциями.

Второе решение менее выгодно в смысле расположения проводников в пазу, так как при нем больше места займет изоляция витков, зато оно дает возможность отказаться от уравнительных соединений.

Обмотка параллельного возбуждения главных полюсов должна быть перемотана из условий:

число витков

$$w' = \frac{U'}{U} w = \frac{230}{115} 447 = 894;$$

сечение проводника

$$q' = \frac{U}{U'} q = \frac{115}{230} 4{,}2 = 2{,}1 \text{ мм}^2.$$

При таком сечении уже не придется применить проводник прямоугольного сечения; его необходимо будет заменить круглым, вследствие чего вес обмотки несколько возрастет.

Напротив, обмотка последовательного возбуждения главных полюсов и обмотка добавочных полюсов, имеющие по две параллельные ветви, могут быть оставлены при условии переключения катушек всех полюсов с двух параллельных групп на последовательное соединение.

Напряжение между соседними пластинами коллектора

$$e_к = \frac{2pU'}{K} 2 = \frac{6 \cdot 230}{189} \cdot 2 = 14{,}6 \text{ в}$$

не выходит за пределы допустимого.

При переделке в двигатель с указанными данными отношение произведения исходного напряжения на требуемую скорость вращения к произведению требуемого напряжения на исходную скорость вращения очень близко к единице:

$$\frac{Un'}{U'n} = \frac{115 \cdot 1500}{220 \cdot 800} = 0{,}985.$$

Поэтому обмотка якоря может быть сохранена без всяких изменений. Для того чтобы точнее судить об изменении величины магнитного потока, следует ввести в это отношение вместо напряжений электродвижущие силы.

Из примера 20 известно, что электродвижущая сила в обмотке якоря генератора равна

$$E = 121{,}9 \text{ в}.$$

Разность между ней и напряжением $U$ составляет

$$E - U = 121{,}9 - 115{,}0 = 6{,}9 \text{ в}.$$

При том же токе якоря электродвижущая сила двигателя будет равна разности:

$$E' = 220{,}0 - 6{,}9 = 213{,}1 \text{ в}$$

Отсюда

$$\frac{En'}{E'n} = \frac{121{,}9 \cdot 1500}{213{,}1 \cdot 800} = 1{,}075.$$

Таким образом, изменение магнитного потока будет иметь место на 7,5% в сторону его уменьшения, что вполне приемлемо.

Обмотка параллельного возбуждения должна быть поэтому выполнена точно так же, как и в предыдущем случае; что касается обмоток последовательного возбуждения и добавочных полюсов, то они ни в каких изменениях не нуждаются, поскольку обмотка якоря сохранена полностью.

Ввиду увеличения скорости вращения почти вдвое, номинальный ток, определенный в примере 18 для генератора равным $I = 955$ *а*, может быть увеличен примерно на 20%:

$$I' \approx 1{,}2I = 1{,}2 \cdot 955 = 1145 \text{ а},$$

что дает потребляемую мощность

$$P = \frac{U'I'}{1000} = \frac{220 \cdot 1145}{1000} = 252 \text{ квт}.$$

Если предположить, что внутри двигателя будет поглощено около 10% этой мощности, на валу его выделится

$$252 \cdot 0{,}9 = 227 \text{ квт}.$$

Повышение скорости вращения до 1500 *об/мин* является вполне допустимым; действительно, по своей мощности данный двигатель подходит к типу ПН-1750 (см. таблицу приложения VII), для которого указаны наибольшие скорости вращения, близкие к требуемой.

Пример 24. Четырехполюсный двигатель мощностью в 2,8 *квт* с номинальным напряжением $U = 220$ *в* при номинальной скорости вращения $n = 1500$ *об/мин* имеет якорь, данные которого соответствуют примерам 10 и 14.

Требуется определить:

а) какие скорости вращения могут быть получены без перемотки якоря при сохранении номинального напряжения;

б) как нужно перемотать якорь, чтобы двигатель имел скорость вращения $n' = 2400$ *об/мин* при том же напряжении.

Согласно примеру 14, данный якорь намотан секциями из 7 витков, причем сечение проводника не подразделено. Поэтому удвоение числа витков согласно рис. 73, дающее уменьшение скорости вдвое, произведено быть не может.

Увеличение числа параллельных ветвей путем перехода на простую петлевую обмотку без уравнительных соединений нежелательно, так как при переходе на удвоенную скорость вращения мощность увеличится примерно до

$$2 \cdot 1{,}2 \cdot 2{,}8 = 6{,}75 \text{ квт}.$$

Уже исходный режим дает мощность, близкую к пределу применимости простой петлевой обмотки без уравнительных соединений, которая поэтому является нежелательной; тем более это неприемлемо при возросшей мощности.

Кроме того, удвоенная скорость $n' = 3000$ *об/мин* заставляет опасаться за механическую прочность якоря, так как лежит несколько выше наиболь-

шей скорости вращения для типа ПН-28,5 в таблице приложения VII, к которому подходит исходный двигатель.

Для получения скорости вращения $n' = 2400$ *об/мин* следует уменьшить число витков в секции до

$$w' = \frac{n}{n'} w = \frac{1560}{2400} \cdot 7 = 4{,}4.$$

Так как принять дробное число витков нельзя, следует намотать якорь поочередно секциями из 4 и из 5 витков.

## 21. РАСЧЕТ БАНДАЖЕЙ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Лобовые части обмотки якоря, а в якорях, не имеющих клиньев, также и пазовые части скрепляются при помощи проволочных бандажей, без которых медная обмотка, не обладающая значительной механической прочностью, не могла бы противостоять центробежным силам, развивающимся в ней при вращении якоря.

Материалом для изготовления бандажей служит обычно полированная стальная проволока, называемая иногда „струнной“ или „фортепианной“, диаметром от 0,5 до 2 *мм*; значительно реже применяется бронзовая проволока.

В зависимости от размеров якоря и скорости его вращения, бандажи на лобовых частях наматываются в один или в несколько слоев; диаметр проволоки берется тем бóльшим, чем больше диаметр якоря.

Чем бандаж шире и толще, тем он прочнее; но одновременно он тем более затрудняет вентиляцию лобовых частей, перекрывая промежутки между ними, и тем труднее его наложить достаточно ровно и с равномерным натягом проволоки.

Поэтому излишне широкие бандажи не только не полезны, но и вредны, и в задачу их расчета входит определение той наименьшей ширины, при которой они еще способны вполне обеспечивать достаточную механическую прочность обмотанного якоря.

Центробежная сила $P$, стремящаяся оторвать предмет, укрепленный на вращающемся теле, пропорциональна квадрату скорости вращения $n$ [*об/мин*], расстоянию $R$ [*см*] от оси вращения до центра тяжести этого предмета и его весу $G$ [*кг*]; чтобы получить результат в *кг*, нужно еще все разделить на $9 \cdot 10^4$:

$$P = \frac{n^2 R G}{9 \cdot 10^4} \; [\text{кг}].$$

Если пазы якоря не имеют клиньев, то обмотка удерживается на месте только бандажами на лобовых и пазовых частях; если предположить еще для простоты, что диаметры тех и других одинаковы и равны $D_б$ [*см*], то при общем весе

обмотки с изоляцией $G'$ [*кг*] центробежная сила, приходящаяся на 1 *см* длины окружности бандажей, будет равна:

$$\frac{P}{\pi D_б} = \frac{n^2RG'}{9\pi D_б \cdot 10^4} \ [кг],$$

а общее усилие, стремящееся разорвать бандажи,

$$\frac{P}{\pi D_б} \frac{D_б}{2} = \frac{n^2RG'}{18\pi \cdot 10^4} \ [кг].$$

Полагая, что все бандажи намотаны проволокой одного и того же диаметра $d_б$ [*см*], а общее число их витков есть $w_б$, можно получить среднее напряжение в бандажах:

$$\sigma = \frac{4}{\pi d_б^2 w_б} \frac{n^2RG'}{18\pi \cdot 10^4} = \frac{n^2RG'}{44{,}4 d_б^2 w_б \cdot 10^4} \ [кг/см^2].$$

Отсюда общее число витков всех бандажей

$$w_б = \frac{n^2RG'}{44{,}4 d_б^2 \sigma \cdot 10^4}. \qquad (80)$$

В действительности бандажи не распределены вполне равномерно по длине якоря и ширина их неодинакова; так, если в пазовой части не рекомендуется брать ширину более 15 *мм*, то в лобовых частях она может быть доведена до 40 *мм*, а в крупных якорях и еще более. Далее, диаметр бандажей в пазовой и лобовых частях обычно бывает несколько различен; наконец в пазовой части и вовсе нет бандажей, если пазы закрыты клиньями.

Во всех таких случаях следует подразделять обмотку на части, приходящиеся на долю каждого из бандажей, и производить их расчет в отдельности, предполагая, что они работают независимо один от другого.

Так, при расчете бандажей на лобовых частях можно в формуле (80) вместо общего веса всей обмотки $G'$ поставить вес одной лобовой части, который во столько раз меньше общего веса, во сколько раз длина одной лобовой части $l_л$ меньше полной длины витка $l_в$, т. е. $G' \frac{l_л}{l_в}$.

Точно так же при расчете бандажей на пазовой части на долю каждого из $n_з$ бандажей приходится $\frac{1}{n_з}$ доля длины пазовой части $l_п$ с весом $G' \frac{l_п}{n_з l_в}$.

Что касается величины расстояния от оси вращения $R$, то для пазовой части она может быть принята равной половине наружного диаметра якоря $D$, уменьшенного на глубину паза $h_n$:

$$R = \frac{D - h_n}{2} \; [см].$$

Но для лобовой части было бы затруднительно дать общее значение этой величины, поскольку в зависимости от конструкции обмоткодержателей лобовые части могут более или менее значительно отгибаться по направлению к оси вала; поэтому для них вопрос о величине $R$ должен решаться в каждом отдельном случае особо. В современных машинах средних и крупных мощностей обычно это отгибание настолько незначительно, что им можно пренебречь и считать, что для лобовых частей величина $R$ имеет то же значение, что и для пазовых.

Напряжение $\sigma$, которое может быть допущено в бандаже, принимается:

для стальной проволоки $\sigma = 3000 \div 3500$ *кг/см*$^2$;

„ бронзовой „ $\sigma = 1800 \div 2000$ *кг/см*$^2$.

Скорость вращения $n$, на которую следует рассчитывать бандажи, должна быть взята больше номинальной скорости вращения, так как при работе всякой машины возможны ненормальные ее повышения; обычно пределом такого повышения, которое должно еще быть безопасным для якоря, принимается 20% сверх наибольшей скорости вращения, допускаемой в эксплуатации, а для генераторов и их возбудителей, приводимых во вращение водяными турбинами,—на 80% сверх номинальной скорости вращения (если нет указания на то, что при их эксплуатации возможны еще более значительные повышения).

Что касается выбора диаметра проволоки $d_б$, следует иметь в виду, что чем он меньше, тем легче бандаж накладывается и тем лучше он пропаивается. Пока не приобретен некоторый опыт в расчете бандажей, можно поэтому рекомендовать начинать расчет с наименьшего диаметра проволоки и только, если он показывает, что полученное число витков $w_б$ не может быть уложено в один слой, переходить к большему диаметру и т. д.

Однако в быстроходных машинах может оказаться, что ни при каком диаметре проволоки бандаж не может быть уложен в один слой; тогда приходится прибегать к многослойным бандажам. Наконец в наиболее быстроходных машинах необходимо бандажировать отдельно каждый слой обмотки и даже уравнительные соединения, если они выполнены по рис. 41 или 42, *б*, причем каждый из бандажей в свою очередь делается многослойным.

Если на поверхности якоря имеются заточки для бандажей с глубиной $h_з$ и осевой длиной $l_з$, то диаметр бандажной про-

волоки следует выбирать с таким расчетом, чтобы бандаж не выступал над остальной поверхностью якоря, учитывая, что под него нужно еще положить изоляционную прокладку толщиной 0,3—0,5 *мм*; число витков в каждом бандаже следует брать таким, чтобы между крайними витками бандажа и краями заточки оставался зазор, не меньший, чем диаметр проволоки:

$$d_б(w_б+2) \leqslant l_з.$$

Если расчет показывает, что бандаж, удовлетворяющий этим условиям, недостаточно прочен, это может рассматриваться как свидетельство чрезмерно высокого значения требуемой скорости вращения; во всяком случае никоим образом не следует рекомендовать углубление заточек, так как и какая-нибудь другая часть машины, прочность которой в готовом якоре нельзя проверить расчетным путем, например коллектор, может оказаться недостаточно надежной.

В тех случаях, когда сердечник якоря с пазами без клиньев не имеет заточек для бандажей, последние приходится накладывать прямо на поверхность обмотанного якоря; при этом диаметр проволоки следует выбирать так, чтобы толщина бандажа вместе с изоляционной прокладкой не превосходила $^1/_3$—$^1/_2$ зазора под главными полюсами.

При расчете многослойных бандажей очень быстроходных машин необходимо учитывать напряжения в бандажах, возникающие не только от давления обмотки на бандаж, но и от собственного веса бандажа; так как такие бандажи обычно пропаиваются насквозь, то вес бандажа определяется не только весом проволоки, но и весом припоя.

Ввиду того что удельный вес припоя близок к удельному весу стали или бронзы, с достаточной для практических целей точностью можно принять вес бандажа равным

$$G_б = \pi D_б d_б^2 w_б \gamma \cdot 10^{-3} \quad [кг],$$

где $\gamma$ — удельный вес материала бандажной проволоки, принимаемый для стали равным 7,85, а для бронзы 8,55 *г/см*³.

Напряжение в бандаже от его собственного веса $\sigma'$ может быть получено из выражения для напряжения $\sigma$, если в него подставить значение веса бандажа $G_б$, а за расстояние $R$ принять половину диаметра бандажа $D_б$:

$$\sigma' = \frac{n^2 \pi D_б^2 d_б^2 w_б \gamma \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 44{,}4\, d_б^2 w_б \cdot 10^4} = \frac{n^2 D_б^2 \gamma}{2{,}83 \cdot 10^8} \quad [кг/см^2]. \qquad (81)$$

Тогда число витков бандажа будет определяться по формуле:

$$w = \frac{n^2 R G'}{44{,}4\, d_б^2 (\sigma - \sigma') \cdot 10^4}. \qquad (80а)$$

Пример 25. Требуется рассчитать бандажи для якоря генератора из примеров 15 и 17, имеющего номинальную скорость $n = 800$ *об/мин.*

Диаметр якоря равен $D = 49$ *см*, а глубина паза $h_n = 4{,}0$ *см*; поэтому расстояние центра тяжести профиля лобовой части от оси вращения

$$R = \frac{D - h_n}{2} = \frac{49 - 4}{2} = 22{,}5 \text{ см.}$$

Пазы якоря снабжены клиньями, поэтому требуется наложение бандажей только на лобовые части; длина витка составляет здесь $l_в = 103{,}8$ *см*, а длина одной лобовой части $l_л = 32.9$ *см*; при полном весе голой меди обмотки якоря $G = 56{,}2$ *кг* вес медн лобовой части составляет

$$G = \frac{l_л}{l_в} = 61{,}5 \cdot \frac{32{,}9}{103{,}8} = 19{,}5 \text{ кг.}$$

Сюда нужно сделать надбавку на вес изоляции порядка 10%, т. е. принять вес лобовой части с изоляцией равным

$$19{,}5 \cdot 1{,}1 = 21{,}5 \text{ кг.}$$

Пусть для пробы диаметр проволоки бандажа будет взят наименьшим, т. е. 0,5 *мм* = 0,05 *см*; тогда число витков бандажа из стальной проволоки при допустимом напряжении $\sigma = 3000$ *кг/см*$^2$ будет, считая на повышение скорости в 20%:

$$w_б = \frac{n^2 R G}{44{,}4\, d_б^2 \sigma \cdot 10^4} = \frac{(1{,}2 \cdot 800)^2 \cdot 22{,}5 \cdot 21{,}5}{44{,}4 \cdot 0{,}05^2 \cdot 3000 \cdot 10^4} = 134.$$

Ширина этого бандажа получится

$$w_б d_б = 134 \cdot 0{,}05 = 6{,}7 \text{ см,}$$

что слишком велико; очевидно, надо взять проволоку большего диаметра $d_б = 1$ *мм* = 0,1 *см*; тогда число витков

$$w_б = \frac{(1{,}2 \cdot 800)^2 \cdot 22{,}5 \cdot 21{,}5}{44{,}4 \cdot 0{,}1^2 \cdot 3000 \cdot 10^4} = 33{,}5.$$

Напряжение в одном бандаже от собственного веса согласно формуле (81) будет, полагая диаметр бандажа равным диаметру якоря $D$,

$$\sigma' = \frac{n^2 D_б^2 \gamma}{2{,}83 \cdot 10^8} = \frac{(1{,}2 \cdot 800)^2 \cdot 49^2 \cdot 7{,}85}{2{,}83 \cdot 10^8} = 61 \text{ кг/см}^2.$$

Тогда число витков должно быть увеличено до

$$w = \frac{(1{,}2 \cdot 800)^2 \cdot 22{,}5 \cdot 21{,}5}{44{,}4 \cdot 0{,}1^2 \cdot (3000 - 61) \cdot 10^4} = 34,$$

т. е. практически остается без изменений.

## 22. РАСЧЕТНЫЙ ФОРМУЛЯР

Как видно из содержания этой книги, расчет всех обмоток машины постоянного тока требует довольно значительного количества вычислений. Каждое из них в отдельности не отличается особой сложностью, не нуждается в применении каких-

либо специальных вычислительных приемов и может быть вполне удовлетворено основными положениями элементарной алгебры и уменьем считать на логарифмической линейке, без которого немыслима никакая продуктивная расчетная работа. Однако будучи связаны большим количеством взаимных влияний, эти вычисления могут давать ясное представление о ходе расчета во всех его подробностях только при условии, что они производятся по определенному плану и оформляются так, что в любой момент времени можно вернуться к каждому из них и произвести его проверку или исправление, обусловленное дальнейшим ходом расчета, в процессе которого возникают новые обстоятельства, вызывающие необходимость в таких исправлениях.

При систематической работе по расчетам существенно важно, чтобы все они проводились и оформлялись по единообразной форме, обеспечивающей легкую обозреваемость всего хода расчета. Это очень важно в особенности в тех случаях, когда приходится пересматривать большое количество ранее выполненных расчетов с целью наведения необходимых справок, например о применявшихся в различных случаях индукциях, плотностях тока и т. д.

Для этой цели может служить предлагаемый расчетный формуляр, в котором сведены все необходимые величины для расчета обмоток машины постоянного тока в удобной для применения последовательности.

Образец такого формуляра, для примера заполненный данными тех расчетов, которые проведены в тексте настоящего руководства, помещен в уменьшенном виде в приложении VIII.

Формуляр состоит из заголовка, ряда граф, посвященных различным этапам расчета, и полосы для подписей.

В заголовке помещены: место для наименования данного предприятия (в левом верхнем углу листа) и место для номера формуляра с указанием порядкового номера листа и общего количества листов формуляра, который может содержать помимо этого основного листа еще те или иные материалы, как, например, схемы, таблицы и т. п.

Середина заголовка отведена под наименование формуляра и основные сведения о перематываемой машине: завод-изготовитель, фирменное типовое обозначение, заводский номер, номер заказа, по которому производится перемотка, наименование заказчика и характеристика исполнения, например: открытый, защищенный или закрытый; с протяжной вентиляцией, с поверхностным обдувом или вовсе без вентиляции и т. д.

Непосредственно под заголовком помещена полоса, содержащая номинальные данные машины до и после перемотки: назначение машины — генератор или двигатель, мощность, напряжение, ток, скорость вращения и действие — продолжительное или кратковременное и т. д.

Понятно, что все данные, относящиеся к машине до перемотки, могут быть проставлены только в том случае, когда на машине сохранился ее прежний фирменный щиток. Что касается данных после перемотки, то такие из них, как мощность и ток, проставляются после выполнения соответствующего этапа расчета, когда выяснятся их значения.

Графа I формуляра (пп. 1—14) содержит данные, получаемые из обмера сердечника якоря, и в пояснениях не нуждается.

Графа II (пп. 15—22) отведена для данных обмера сердечников главных полюсов.

Графа III (пп. 23—28) имеет то же назначение для добавочных полюсов.

Графа IV (пп. 29—32) предназначена для внесения в нее результатов обмера станины.

Графа V (пп. 33—35) служит для вписывания в нее основных сведений о коллекторе.

Графа VI (пп. 36—52) представляет собой место для внесения результатов обработки обмера всех частей машины; к ней примыкает следующая.

Графа VII, представляющая поле для эскиза паза и зубца якоря с размерами.

Графа VIII (пп. 53—61) охватывает общие данные об обмотке якоря, заканчиваясь определением ее числа проводников.

Графа IX (пп. 62—69) представляет собой таблицу значений индукций в отдельных участках магнитной цепи при холостом ходе машины; в ней предусмотрены, кроме того, свободные клетки для вписывания определяемых позднее значений индукций при нагрузке.

Графа X (пп. 70—79) относится к случаю применения обмоток якорей с мягкими секциями; она остается незаполненной в случае применения обмоток с жесткими секциями.

Графа XI представляет графленое поле для вписывания в него всех применяемых видов изоляции обмотки якоря как в пазовых, так и в лобовых частях с их толщинами, что позволяет определить место в пазу, которое может занимать медь проводников, и отсюда найти размеры сечения проводника.

Графа XII (пп. 80—88) играет в отношении обмоток с жесткими секциями ту же роль, что графа X в отношении обмоток с мягкими секциями. В случае применения последних графы XI и XII остаются неиспользованными.

Графа XIII (пп. 89—92) отведена для приближенного определения электрической мощности машины и связанных с нею величин.

Графа XIV (пп. 93—103) служит продолжением и развитием графы IX для подсчета намагничивающей силы.

Графа XV (пп. 104—123) отведена для расчета обмоток главных полюсов. По выполнении вычислений по первым двум пп. 104 и 105 следует заполнение запасных клеток граф IX и

XIV, после чего уже расчет продолжается от п. 106 и до конца графы без перерыва. Так как графа построена для самого общего случая, часть пунктов в ней может остаться неиспользованной.

Графа XVI (пп. 124—131) по назначению аналогична графе XV, но для добавочных полюсов.

Графа XVII (пп. 132—143) построена в виде сводной таблицы сопротивлений и весов меди с изоляцией и без изоляции всех обмоток; такая форма представляется очень удобной при наведении всякого рода справок.

Графа XVIII (пп. 144—150) заканчивает формуляр подбором марки и размеров щеток.

В нижней полосе формуляра отведено место для даты его составления и подписи составившего его лица, а если это требуется, то и лица, проверившего и одобрившего расчет.

Однако никакой расчетный формуляр, как бы хорошо он ни был составлен, как бы удобен он ни был лицам, занимающихся расчетом, не может служить документом для непосредственного исполнения обмоток, так как для лиц, не занимающимся расчетом, было бы чрезвычайно трудно извлекать из всей массы заполняющих его цифр те сведения, которые необходимы для изготовления и наложения обмоток.

Поэтому естественным дополнением к расчетному формуляру является так называемая „обмоточная записка", представляющая собой краткую выдержку из формуляра, содержащую только те сведения, без которых обмотки не могут быть выполнены.

В приложении IX дан образец бланка обмоточной записки, составленной на основании формуляра приложения VIII.

Заголовок и подзаголовок обмоточной записки имеют то же устройство, что и в расчетном формуляре. Записка состоит из четырех столбцов сообразно четырем обмоткам машины постоянного тока: обмотке якоря, обмотке параллельного или независимого возбуждения, обмотке последовательного возбуждения и обмотке добавочных полюсов. Данные, вносимые в 17 строк этих четырех столбцов, вполне достаточны для изготовления обмотки.

В отношении отдельных пунктов этой записки можно отметить следующее: пп. 2, 3 и 4 относятся только к обмотке якоря и потому в столбцах остальных обмоток остаются незаполненными.

В п. 9 — форма сечения — существенно важно словесное определение во избежание всякого рода недоразумений. В п. 10 — марка проводника — проставляются общепринятые условные обозначения; но если обмотка изготовляется из голой меди, которая изолируется уже после намотки, то в этой строке вместо такого обозначения пишется „голый". Размеры проводника как без изоляции, так и с изоляцией вписываются при круглом

сечении с прибавлением знака диаметра (∅), а при прямоугольном сечении в виде произведения сторон, причем до знака умножения пишется всегда меньший размер, а после него — больший.

Следует указать, что для производства все линейные размеры выдаются в миллиметрах. В графу „Примечания“ вносятся необходимые дополнительные сведения, например, данные о числе, шаге и сечении уравнительных соединений и т. п.

Записка имеет в нижней части места для подписей тех же лиц, что и формуляр. В правом нижнем углу как записки, так и формуляра отведены места для взаимных ссылок на их номера.

---

## *ПОЯСНЕНИЯ К РАСЧЕТНОМУ ФОРМУЛЯРУ*

### *Графа I. Якорь*

1. Наружный диаметр якоря $D$ [*см*] } По обмеру.
2. Полная длина сердечника $l_п$ [*см*] } По обмеру.
3. Число пазов $Z$ (по подсчету).
4. Ширина паза $b_п$ [*мм*] } По обмеру (только в случае открытых пазов).
5. Глубина паза $h_п$ [*мм*] } По обмеру (только в случае открытых пазов).
6. Число вентиляционных каналов $n_к$, поперечных или продольных (по подсчету).
7. Ширина поперечного вентиляционного канала $b_к$ [*см*] } По обмеру.
8. Диаметр продольного вентиляционного канала $d_к$ [*см*] } По обмеру.
9. Внутренний диаметр якоря $D_в$ [*см*] } По обмеру.
10. Число заточек под бандажи $n_з$ (по подсчету).
11. Глубина заточек под бандажи $h_з$ [*см*] } По обмеру.
12. Осевая длина заточек под бандажи $l_з$ [*см*] } По обмеру.
13. Толщина листов стали $\Delta$ [*мм*] (определяется подсчетом числа листов на небольшом отрезке длины).
14. Изоляция листов стали (бумага, лак, без изоляции).

### *Графа II. Главные полюса*

15. Число главных полюсов $2p$ (по подсчету).
16. Полюсная дуга $b_в$ [*см*] } По обмеру.
17. Ширина сердечника $b_г$ [*см*] } По обмеру.
18. Осевая длина сердечника $l_г$ [*см*] } По обмеру.
19. Высота полюса $h_г$ [*см*] } По обмеру.
20. Зазор под главными полюсами $\delta_г$ [*мм*] } По обмеру.
21. Толщина листов стали $\Delta$ [*мм*] (определяется подобно п. 13).
22. Материал сердечника (если он массивный).

### *Графа III. Добавочные полюса*

23. Число добавочных полюсов $2p'$ (по подсчету).
24. Ширина башмака $b_д'$ [*см*] (по обмеру).

25. Ширина сердечника $b_д$ [$см$]
26. Осевая длина сердечника $l_д$ [$см$]
27. Высота сердечника $h_д$ [$см$]
28. Зазор под добавочными полюсами $\delta_д$ [$мм$]

} По обмеру.

### *Графа IV. Станина*

29. Внутренний диаметр станины $D_c$ [$см$]
30. Высота сечения станины $h_c$ [$см$]
31. Осевая длина станины $l_c$ [$см$]

} По обмеру.

Примечание. В случае сложной формы сечения станины — снять его эскиз.

32. Материал станины (по осмотру).

### *Графа V. Коллектор*

33. Диаметр коллектора $D_к$ [$см$]
34. Осевая длина рабочей части коллектора $l_к$ [$см$]

} По обмеру.

35. Число пластин $K$ (по подсчету).

### *Графа VI. Обработка обмера*

36. Расчетная длина якоря:

а) при наличии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_n - \frac{1}{2} n_к b_к \; [см]; \tag{1}$$

б) при отсутствии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_n \; [см]. \tag{1а}$$

37. Коэффициент заполнения листов стали $k_0$ (берется в соответствии с толщиной листов $\Delta$ и их изоляцией по табл. 1, § 3).
38. Чистая длина стали сердечника якоря:

а) при наличии поперечных вентиляционных каналов

$$l_0 = k_0 (l_n - n_к b_к) \; [см]; \tag{2}$$

б) при отсутствии поперечных вентиляционных каналов

$$l_0 = k_0 l_n \; [см). \tag{2а}$$

39. Зубцовое деление якоря на поверхности якоря

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} \; [см]. \tag{3}$$

40. Зубцовое деление по дну пазов

$$t_2 = \frac{\pi(D - 2h_n)}{Z}\ [см]. \qquad (4)$$

41. Расчетная ширина зубца (если ширина зубца непостоянна по его высоте)

$$b_з = b_з'' + \frac{b_з' - b_з''}{3}\ [мм], \qquad (6)$$

где наибольшая ширина зубца

$$b_з' = t_1 - b_n\ [мм], \qquad (5)$$

и наименьшая ширина зубца

$$b_з'' = t_2 - b_n\ [мм]. \qquad (5а)$$

Последние два размера наносятся в *мм* на эскиз паза и зубца якоря в графе VII.

42. Расчетная высота тела якоря:

а) при отсутствии продольных вентиляционных каналов

$$h_m = \frac{1}{2}(D - 2h_n - D_в)\ [см]; \qquad (7)$$

б) при наличии продольных вентиляционных каналов

$$h_m = \frac{1}{2}(D - 2h_n - D_в) - \frac{2}{3}\, d_к\ [см]. \qquad (7а)$$

43. Площадь паза якоря $q_n$ $[мм^2]$ (вычисляется по формулам рис. 4 только в случае полузакрытых пазов).

44. Площадь зазора

$$Q_в = b_в l\ [см^2]. \qquad (8)$$

45. Расчетное сечение зубцов якоря

$$Q_з = \frac{b_з l_0 b_в}{t_1}\ [см^2]. \qquad (9)$$

46. Площадь поперечного сечения тела якоря

$$Q_m = l_0 h_m\ [см^2]. \qquad (10)$$

47. Коэффициент заполнения листов стали сердечника главного полюса $k_0$ (берется $k_0 = 0{,}95$ при $\Delta = 1$ *мм* и $k_0 = 0{,}97$ при $\Delta = 1{,}5$ *мм*).

48. Площадь поперечного сечения сердечника главного полюса

$$Q_г = k_0 b_г l_г\ [см^2]. \qquad (11)$$

49. Площадь поперечного сечения станины при прямоугольной форме

$$Q_c = l_c h_c \ [см^2]. \qquad (12)$$

Примечание. При сложной форме вычисляется в соответствии с эскизом сечения.

50. Расчетная толщина слоя зубцов якоря:

а) при прямоугольных открытых пазах

$$L_з = 2h_n \ [см]; \qquad (13)$$

б) при овальных полузакрытых пазах

$$L_з = 2(h_n - 0{,}2r_1) \ [см]. \qquad (13а)$$

51. Длина магнитного пути в теле якоря

$$L_m = \frac{\pi(D - 2h_n - h_m)}{2p} + h_m \ [см]. \qquad (14)$$

52. Длина среднего волокна станины

$$L_c = \frac{\pi(D_c + h_c)}{2p} \ [см]. \qquad (15)$$

## *Графа VII. Эскиз паза и зубца якоря*

При полузакрытых пазах на эскизе проставляются размеры в *мм*:

а) Полная глубина паза $h_n$.

б) Наибольшая ширина паза $b_1$ } Если

в) Наименьшая ширина паза $b_2$ } $b_n \neq b_1 \neq b_2$.

г) Расстояние по высоте между местами измерения наибольшей и наименьшей ширины $h$.

д) Ширина отверстия $b_0$.

е) Высота усика у отверстия $h_y$.

ж) Ширина зубца в наиболее широком месте $b'_з$.

з) Ширина зубца в наиболее узком месте $b''_з$.

## *Графа VIII. Обмотка якоря*

53. Тип обмотки (указывается словесно).

54. Число параллельных ветвей:

а) простая петлевая обмотка

$$2a = 2p; \qquad (18)$$

б) простая волновая обмотка

$$2a = 2; \qquad (24)$$

в) двукратно-замкнутая волновая обмотка

$$2a = 4; \tag{26}$$

г) двухходовая петлевая обмотка

$$2a = 4p. \tag{21}$$

55. Число секций в катушке

$$u = \frac{K}{Z}. \tag{27}$$

56. Первый частичный шаг

$$y_1 \approx \frac{K}{2p}. \tag{28}$$

Примечание. Величина шага округляется до ближайшего целого значения, а при равносекционной обмотке — еще и кратного числу секций в катушке $u$.

57. Второй частичный шаг:

а) при простой петлевой обмотке

$$y_2 = y_1 \mp 1; \tag{16}$$

б) при двухходовой петлевой обмотке

$$y_2 = y_1 \mp 2; \tag{19}$$

знак (—) дает прямо-ходовые обмотки, знак (+)—обратно-ходовые;

в) при всякой волновой обмотке

$$y_2 = y - y_1. \tag{22}$$

58. Полный шаг:

а) при простой петлевой обмотке

$$y = 1; \tag{17}$$

б) при двухходовой петлевой обмотке

$$y = 2; \tag{20}$$

в) при простой волновой обмотке

$$y = \frac{K \pm 1}{p}; \tag{23}$$

г) при двукратно-замкнутой волновой обмотке

$$y = \frac{K \pm 2}{p}; \tag{25}$$

знак (—) дает обратно-ходовые обмотки, знак (+)—прямо-ходовые;

д) при искусственно-замкнутой волновой обмотке

$$y = \frac{K}{p}. \tag{29}$$

59. Число уравнительных соединений $n_y$ (выбирается равным $\frac{K}{p}$ или одному из его множителей).

60. Средняя ширина секции

$$T = \frac{\pi (D - h_n) y_1}{Zu} \ [см]. \tag{39}$$

Величины, не вносимые в формуляр:

а) Предварительное значение индукции в зазоре $B_в$ [$гс$] (выбирается в соответствии с размерами и родом исполнения машины).

б) Предварительное значение магнитного потока

$$\Phi = B_в Q_в \ [мкс]. \tag{30}$$

61. Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{60Ea \cdot 10^8}{\Phi pn}. \tag{31а}$$

(Определяется по предварительному значению магнитного потока и проверяется на пригодность для данного числа пазов $Z$ и типа обмотки, после чего в формуляр вписывается исправленное значение.)

*Графа IX. Проверка магнитной цепи*

62. Электродвижущая сила при холостом ходе $E$ [$в$] (принимается равной номинальному напряжению $U$).

63. Магнитный поток

$$\Phi = \frac{60Ea \cdot 10^8}{Npn} \ [мкс]. \tag{31}$$

64. Индукция в зазоре

$$B_в = \frac{\Phi}{Q_в} \ [гс]. \tag{32}$$

65. Индукция в зубцах якоря

$$B_з = \frac{\Phi}{Q_з} \ [гс]. \tag{33}$$

66. Индукция в теле якоря

$$B_m = \frac{\Phi}{2Q_m} \ [гс]. \tag{34}$$

67. Коэффициент рассеяния главных полюсов $k_p$ (принимается в пределах 1,1—1,25 в зависимости от соотношения между полюсной дугой и промежутками между главными и добавочными полюсами).

68. Индукция в сердечнике главного полюса

$$B_г = \frac{k_p \Phi}{Q_г} \ [гс]. \qquad (35)$$

69. Индукция в станине

$$B_c = \frac{k_p \Phi}{2Q_c} \ [гс]. \qquad (36)$$

Примечание. Сосчитанные значения индукций сверяются с их рекомендованными пределами в § 11.

## *Графа X. Мягкие секции*

70. Марка проводника (выбирается по таблице А приложения I в соответствии с наличностью).

71. Число параллельных сечений проводника $c$ (задается так, чтобы диаметр проводника не превосходил 2 *мм*).

72. Коэффициент заполнения паза $f_п$ (выбирается в соответствии с указаниями § 12 и исправляется после окончательного выбора проводника).

73. Сечение проводника с изоляцией

$$q' = \frac{Zq_п f_п}{Nc} \ [мм^2] \qquad (37)$$

(исправляется после окончательного выбора проводника).

74. Диаметр проводника с изоляцией

$$d' = \sqrt{\frac{4q'}{\pi}} \ [мм] \qquad (38)$$

(принимается равным сумме двухсторонней толщины изоляции данной марки по таблице Б приложения I и одного из нормальных диаметров меди $d$ по таблице В того же приложения).

75. Диаметр проводника без изоляции $d$ [*мм*].

76. Сечение проводника без изоляции $q$ [$мм^2$] (берется по таблице В приложения I в соответствии с выбранным диаметром $d$).

77. Коэффициент длины лобовой части $K_м$ (для двухполюсных якорей принимается равным 1,25, а для четырехполюсных—1,3).

78. Постоянное слагаемое $L$ [*см*] (принимается в пределах от 1 до 3 *см* в зависимости от размеров якоря).

79. Длина лобовой части

$$l_л = K_м T + L \ [см]. \qquad (40)$$

### *Графа XI. Укладка жестких секций*

Производится подсчет суммы толщин изоляции всех видов по ширине и по высоте паза с учетом разбухания от пропитки и необходимых зазоров, после чего определяется остаток места для меди проводников и размеры последних, которые уточняются по таблице В приложения II. Кроме того, производится подсчет двухсторонней общей толщины изоляции в лобовых частях, но не вписывается в формуляр.

### *Графа XII. Жесткие секции (определение размеров)*

80. Суммарная ширина секций катушки с их изоляцией в лобовой части $B$ [*мм*].
81. Суммарная высота секций катушки с их изоляцией в лобовой части $H$ [*мм*].

    Оба эти размера определяются по данным графы XI.
82. Длина прямолинейного участка секции $M$ [*см*] (берется конструктивно по соображениям § 14).
83. Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений катушек в лобовой части

$$f = B + (0{,}15 \div 0{,}20).u \ [мм]. \qquad (41)$$

84. Наименьшее расстояние между осями поперечных сечений катушек в пазовой части

$$t = \frac{t_1 + 3t_2}{4} \ [мм]. \qquad (42)$$

85. Отношение наименьших расстояний $f:t$.
86. Коэффициент длины наклонного участка лобовой части $K_{ж}$ (берется по табл. 2 § 14).
87. Радиус закругления головки катушки $R$ [*см*] (берется по соображениям § 14).
88. Длина лобовой части

$$l_l = 2M + K_{ж}T + \pi\left(R + \frac{H}{2}\right) [см]. \qquad (43)$$

### *Графа XIII. Ток и мощность*

89. Плотность тока в обмотке якоря $s_я$ [$a/мм^2$] (берется из приложения IV по соображениям § 15).
90. Ток якоря

$$I = 2acqs_я \ [a]. \qquad (49)$$

91. Электрическая мощность машины

$$P = UI \cdot 10^{-3} \ [квт]. \qquad (50)$$

92. Линейная нагрузка

$$AS = \frac{NI}{\pi D \cdot 2a} \quad [a\ см] \tag{51}$$

(проверяется по приложению IV).

*Графа XIV. Намагничивающая сила главных полюсов*

93. Коэффициент зазора:

$$k_в = \frac{t_1 + 10\,\delta_г}{t_1 - b_n + 10\,\delta_г}\,. \tag{52}$$

94. Напряженность поля для зубцов якоря $H_з$ [*ав см*] (берется в соответствии с индукцией $B_з$ по таблице Б приложения V).
95. Напряженность поля для тела якоря $H_m$ [*ав/см*] (берется в соответствии с индукцией $B_m$ по таблице А приложения V).
96. Напряженность поля для сердечников главных полюсов $H_г$ [*ав см*] (берется в соответствии с индукцией $B_г$ по таблице *В* приложения V).
97. Напряженность поля для станины $H_c$ [*ав/см*] (берется в соответствии с индукцией $B_c$ в зависимости от материала станины по таблицам Г и Д приложения V).
98. Намагничивающая сила для зазора

$$F_в = 1{,}6\,B_в k_в \delta_г \quad [ав]. \tag{53}$$

99. Намагничивающая сила для зубцов якоря

$$F_з = H_з L_з \quad [ав]. \tag{54}$$

100. Намагничивающая сила для тела якоря

$$F_m = H_m L_m \quad [ав]. \tag{55}$$

101. Намагничивающая сила для сердечников главных полюсов

$$F_г = 2H_г h_г \quad [ав]. \tag{56}$$

102. Намагничивающая сила для станины

$$F_c = H_c L_c \quad [ав]. \tag{57}$$

103. Полная намагничивающая сила при холостом ходе

$$F = F_в + F_з + F_m + F_г + F_c \quad [ав]. \tag{58}$$

*Графа XV. Обмотки главных полюсов*

104. Падение напряжения в контакте щеток на коллекторе $\Delta U$ [*в*] (принимается равным 1 *в* при угольных и графитных щетках и 0,3 *в*—при металло-угольных или металло-графитных).

105. Электродвижущая сила при нагрузке

$$E = U \pm 1{,}24 I \, (r_я + r_c + r_д) \pm 2\Delta U \; [в] \qquad (59)$$

(знак (+) для генератора и знак (—) для двигателя). После этого в случае генератора производится определение магнитного потока при нагрузке по п. 63, индукции по пп. 64—66 и 68—69, напряженностей поля и намагничивающих сил по пп. 94—103; найденные значения вносятся в соответствующие клетки граф IX и XIV.

106. Средняя толщина катушки параллельного или независимого возбуждения $b_{ср}$ [*см*] (определяется по эскизу главного полюса).

107. Средняя длина витка обмотки параллельного или независимого возбуждения

$$l_в = 2\,(b_г + l'_г + 1) + \pi\, b_{ср} \; [см]. \qquad (62)$$

108. Плотность тока в обмотке параллельного или независимого возбуждения $s_ш$ [*а/мм*²] (берется в 2—2,5 раза меньше плотности тока в обмотке якоря $s_я$).

109. Коэффициент запаса возбуждения $k_ш$ (берется для генератора с параллельным или независимым возбуждением равным 0,6, а для генератора со смешанным возбуждением и для двигателя с параллельным или смешанным возбуждением равным 0,7).

110. Число витков обмотки параллельного или независимого возбуждения на один полюс

$$w_ш = \frac{5700\, k_ш U}{2 p l_в s_ш} \qquad (61)$$

(при параллельном возбуждении напряжение $U$ берется равным номинальному напряжению машины, при независимом возбуждении—равным номинальному напряжению источника возбуждения).

111. Ток возбуждения

$$i_ш = \frac{F}{2 w_ш} \; [а] \qquad (63)$$

(значение намагничивающей силы для генератора берется при нагрузке, для двигателя—при холостом ходе).

112. Сечение проводника обмотки параллельного или независимого возбуждения

$$q_ш = \frac{i_ш}{s_ш} \; [мм]^2. \qquad (64)$$

113. Диаметр проводника без изоляции

$$d_ш = \sqrt{\frac{4 q_ш}{\pi}} \; [мм]. \qquad (65)$$

В случае, если обмотка выполняется проводником прямоугольного сечения, вместо этого по таблице В приложения II подыскиваются подходящие размеры сечения.

114. Марка проводника.

115. Диаметр проводника с изоляцией $d'_ш$ [*мм*] (определяется в соответствии с диаметром без изоляции и маркой проводника по таблице Б приложения I; в случае применения проводника прямоугольного сечения вместо этого определяются размеры сечения с изоляцией по таблице Б приложения II).

116. Число витков обмотки последовательного возбуждения на один полюс

$$w_c = \frac{F}{2I} \qquad (68)$$

(для двигателей с чисто-последовательным возбуждением берется значение намагничивающей силы при нагрузке; для генератора со смешанным возбуждением—разность намагничивающих сил при нагрузке и при холостом ходе).

117. Плотность тока в обмотке последовательного возбуждения $s_c$ [$а/мм^2$] (берется примерно на 20% выше плотности тока в обмотке параллельного возбуждения).

118. Число параллельных ветвей обмотки последовательного возбуждения $a_c$ (берется по соображениям примера 20).

119. Сечение проводника обмотки последовательного возбуждения

$$q_c = \frac{I}{a_c s_c} \; [мм^2]. \qquad (69)$$

120. Диаметр проводника без изоляции

$$d_c = \sqrt{\frac{4q_c}{\pi}} \; [мм]$$

(см. примечание к п. 113).

121. Марка проводника.

122. Диаметр проводника с изоляцией $d'_c$ [*мм*] (см. примечание к п. 115, если только не применяется голая медь).

123. Длина витка обмотки последовательного возбуждения

$$l_в = 2(b_г + l_г + 1) + \pi b_{ср} \; [см]. \qquad (62)$$

## *Графа XVI. Обмотка добавочных полюсов*

124. Число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов $a_д$ (берется по соображениям § 18).

125. Число витков на одном добавочном полюсе

$$w_д = \frac{0{,}625 N a_д}{2p \cdot 2a}. \qquad (71)$$

126. Плотность тока в обмотке добавочных полюсов $s_д$ $[а/мм^2]$ (берется при изолированном проводнике так же, как и для обмотки последовательного возбуждения, а при голом проводнике примерно на 40% выше, чем для обмотки параллельного возбуждения).

127. Сечение проводника

$$q_д = \frac{I}{a_д s_д} \quad [мм^2]. \tag{72}$$

128. Диаметр проводника без изоляции

$$d_д = \sqrt{\frac{4q_д}{\pi}} \quad [мм]$$

(см. примечание к п. 113).

129. Марка проводника.

130. Диаметр проводника с изоляцией $d'_д$ $[мм]$ (см. примечание к пп. 115 и 122).

131. Длина витка обмотки добавочных полюсов:

а) в случае изолированного проводника или голого проводника, намотанного плашмя

$$l_в = 2(b_д + l_д + 1) + \pi\, b_{ср} \quad [см]; \tag{73}$$

б) в случае голого проводника, намотанного на высокое ребро с шириной $b$

$$l_в = 2l_д + \pi(b_д + b + 1) \quad [см]. \tag{74}$$

*Графа XVII. Сопротивления и веса обмоток*

132. Сопротивление обмотки якоря:

а) в случае проводника круглого сечения

$$r_я = \frac{Nl_в r}{2\,(2a)^2 c \cdot 10^5} \quad [ом]. \tag{45a}$$

Примечание. Входящее сюда сопротивление $r$ одного километра проводника берется в соответствии с его диаметром $d$ по таблице В приложения 1,

б) в случае проводника любого сечения

$$r_я = \frac{Nl_в}{11\,400\,(2a)^2\, cq} \quad [ом]. \tag{45}$$

133. Сопротивление обмотки главных полюсов параллельного или независимого возбуждения:

а) в случае проводника круглого сечения

$$r_ш = \frac{2pw_ш l_н r}{10^5} \quad [ом]; \tag{60a}$$

б) в случае проводника любого сечения

$$r_{ш} = \frac{2pw_{ш}l_{в}}{5700\, q_{ш}} \ [ом]. \qquad (60)$$

134. Сопротивление обмотки главных полюсов последовательного возбуждения:

а) в случае проводника круглого сечения

$$r_{c} = \frac{2pw_{c}l_{в}r}{a_{c}^{2}\cdot 10^{5}} \ [ом]; \qquad (70а)$$

б) в случае проводника любого сечения

$$r_{c} = \frac{2pw_{c}l_{в}}{5700\, a_{c}^{2}\, q_{c}} \ [ом]. \qquad (70)$$

135. Сопротивление обмотки добавочных полюсов $r_{д}$ определяется по формулам (70) или (70а) п. 134 с заменой значков при обозначениях.

136. Вес меди обмотки якоря без изоляции:

а) в случае проводника круглого сечения

$$G_{я} = \frac{N}{2}\, cl_{в}g\cdot 10^{-5} \ [кг]. \qquad (46а)$$

Примечание. Входящий сюда вес $g$ одного километра проводника берется в соответствии с его диаметром $d$ по таблице В приложения 1.

б) в случае проводника любого сечения

$$G_{я} = 8{,}9\,\frac{N}{2}\, cql_{в}\cdot 10^{-5} \ [кг]. \qquad (46)$$

137. Вес меди обмотки параллельного или независимого возбуждения без изоляции:

а) в случае проводника круглого сечения

$$G_{ш} = 2pw_{ш}l_{в}g\cdot 10^{-5} \ [кг]; \qquad (67)$$

б) в случае проводника любого сечения

$$G_{ш} = 8{,}9\cdot 2pw_{ш}l_{в}q_{ш}\cdot 10^{-5} \ [кг]. \qquad (66)$$

138. Вес меди обмотки последовательного возбуждения без изоляции $G_{c}$ определяется по формулам (66) или (67) п. 137 с заменой значков при обозначениях.

139. Вес меди обмотки добавочных полюсов без изоляции $G_{д}$ определяется по формулам (66) или (67) п. 137 с заменой значков при обозначениях.

140. Вес меди обмотки якоря с изоляцией (если не применяется голый проводник):

а) в случае проводника круглого сечения

$$G'_я = \left[0{,}876 + 0{,}124 \cdot \left(\frac{d'}{d}\right)^2\right] G_я \quad [кг]; \tag{47}$$

б) в случае проводника марки ПБД любого сечения

$$G'_я = 1{,}04\, G_я \quad [кг]. \tag{48}$$

141. Вес меди обмотки параллельного или независимого возбуждения с изоляцией $G'_ш$ определяется по формулам (47) или (48) п. 140.

142. Вес меди обмотки последовательного возбуждения с изоляцией $G'_c$ (если не применяется голый проводник) определяется по формулам (47) или (48) п. 140.

143. Вес меди обмотки добавочных полюсов с изоляцией $G'_д$ (если не применяется голый проводник) определяется по формулам (47) или (48) п. 140.

## *Графа XVIII. Щетки*

144. Число щеткодержательных пальцев $n_п$ (в большинстве случаев берется равным числу полюсов $2p$, и только в мелких четырехполюсных машинах с волновой обмоткой допускается половинное число пальцев).

145. Число щеток на пальце $n_щ$ (определяется с учетом расстановки щеток вдоль оси коллектора).

146. Марка щеток (выбирается по соображениям § 19).

147. Допустимая плотность тока под щетками $s_щ$ [$а/см^2$] (назначается в соответствии с выбранной маркой щеток).

148. Площадь контакта щетки

$$q_щ = \frac{2I}{n_п n_щ s_щ} \quad [см^2]. \tag{75}$$

149. Длина щетки $l_щ$ [$мм$].

150. Ширина щетки $b_щ$ [$мм$].

## Медь обмоточная круглая

### *А. Марки проводника*

ПБО — один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПБД — два слоя хлопчатобумажной пряжи;
ПБОО — один слой хлопчатобумажной пряжи и одна хлопчатобумажная оплетка;
ПШО — один слой шелковой пряжи;
ПШД — два слоя шелковой пряжи;
ПЭЛ2 — лакостойкая эмаль;
ПЭЛ1 — лакостойкая эмаль повышенного качества;
ПЭТ — тепло- и лакостойкая эмаль;
ПЭШО — эмаль и один слой шелковой пряжи;
ПЭЛШО — лакостойкая эмаль и один слой шелковой пряжи;
ПЭБО — эмаль и один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПЭЛБО — лакостойкая эмаль и один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПСД — два слоя стеклянной пряжи, пропитанной лаком;
ПДА — один слой асбестового волокна, подклеенного к меди и пропитанного лаком.

### *Б. Двухсторонняя толщина изоляции проводников различных марок*

| Марка | Диаметр круглого голого проводника *d* [*мм*] | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,05—0,09 | 0,10—0,19 | 0,20—0,25 | 0,27—0,29 | 0,31—0,38 | 0,41—0,49 | 0,51—0,69 | 0,72—0,96 | 1,00—1,45 | 1,50—2,10 | 2,26—5,20 |
| ПБО | — | — | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | — |
| ПБД | — | — | 0,19 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,27 | 0,27 | 0,33 |
| ПБОО | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,85 | 0,85 | 0,85 |
| ПШО | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | — | — | — | — |
| ПШД | Изготовляется по особым техническим условиям | | | | | | | | | | |
| ПЭЛ1,2 | 0,015 | 0,020 | 0,025 | 0,035 | 0,040 | 0,045 | 0,050 | 0,060 | 0,07—0,08 | 0,08 | — |
| ПЭТ | — | — | — | — | 0,040 | 0,045 | 0,050 | 0,060 | 0,07—0,08 | 0,08 | — |
| ПЭШО | 0,070 | 0,075 | 0,090 | 0,100 | 0,105 | 0,110 | 0,115 | 0,125 | 0,135 | — | — |
| ПЭБО | — | — | 0,125 | 0,155 | 0,160 | 0,165 | 0,170 | 0,180 | 0,210 | 0,210 | — |
| ПСД | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,25 | 0,25 | 0,30 |
| ПДА | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,25 | 0,25 | 0,30 |

Примечания. 1. Изоляция проводника марки ПШД может быть принята примерно вдвое толще, чем марки ПШО. 2. Проводники с чисто эмалевой изоляцией диаметром по меди выше 1,56 *мм* изготовляются по особым техническим условиям. 3. Толщина изоляции проводников марок ПЭЛШО и ПЭЛБО соответственно та же, что и марок ПЭШО и ПЭБО. 4. Проводник марки ПДА изготовляется только до диаметра по меди 4,8.

*В. Номинальные диаметры d, сечения q, веса g и сопротивления 1 км меди обмоточной круглой*

| Диаметр d [мм] | Сечение q [мм²] | Вес 1 км g [кг] | Сопротивление 1 км при 15°С, ом | Диаметр d [мм] | Сечение q [мм²] | Вес 1 км g [кг] | Сопротивление 1 км при 15°С, ом | Диаметр d [мм] | Сечение q [мм²] | Вес 1 км g [кг] | Сопротивление 1 км при 15°С, ом |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,05 | 0,00196 | 0,01746 | 9100 | 0,47 | 0,1735 | 1,542 | 99,2 | (1,30) | 1,327 | 11,80 | 12,96 |
| 0,06 | 0,00283 | 0,0252 | 6310 | (0,49) | 0,1886 | 1,676 | 91,3 | 1,35 | 1,431 | 12,73 | 12,01 |
| 0,07 | 0,00385 | 0,0342 | 4630 | 0,51 | 0,204 | 1,816 | 84,4 | (1,40) | 1,539 | 13,69 | 11,18 |
| 0,08 | 0,00503 | 0,0447 | 3550 | (0,53) | 0,221 | 1,961 | 77,8 | 1,45 | 1,651 | 14,68 | 10,41 |
| 0,09 | 0,00636 | 0,0566 | 2810 | 0,55 | 0,238 | 2,11 | 72,3 | (1,50) | 1,767 | 15,71 | 9,74 |
| 0,10 | 0,00785 | 0,0698 | 2270 | (0,57) | 0,255 | 2,27 | 67,5 | 1,56 | 1,911 | 16,99 | 9,00 |
| 0,11 | 0,00950 | 0,0845 | 1813 | 0,59 | 0,273 | 2,43 | 63,0 | (1,62) | 2,06 | 18,32 | 8,36 |
| 0,12 | 0,01131 | 0,1005 | 1524 | (0,62) | 0,302 | 2,68 | 57,0 | 1,68 | 2,22 | 19,71 | 7,75 |
| 0,13 | 0,01327 | 0,1180 | 1296 | 0,64 | 0,322 | 2,86 | 53,4 | (1,74) | 2,38 | 21,1 | 7,23 |
| 0,14 | 0,01539 | 0,1368 | 1118 | (0,67) | 0,353 | 3,13 | 48,7 | 1,81 | 2,57 | 22,9 | 6,70 |
| 0,15 | 0,01767 | 0,1571 | 974 | 0,69 | 0,374 | 3,32 | 46,0 | (1,88) | 2,78 | 24,7 | 6,19 |
| 0,16 | 0,0201 | 0,1788 | 856 | (0,72) | 0,407 | 3,62 | 42,3 | 1,95 | 2,99 | 26,5 | 5,76 |
| 0,17 | 0,0227 | 0,202 | 758 | 0,74 | 0,430 | 3,82 | 40,0 | (2,02) | 3,20 | 28,5 | 5,38 |
| 0,18 | 0,0255 | 0,226 | 674 | (0,77) | 0,466 | 4,14 | 36,9 | 2,10 | 3,46 | 30,8 | 4,97 |
| 0,19 | 0,0284 | 0,252 | 606 | 0,80 | 0,503 | 4,47 | 34,2 | 2,26 | 4,01 | 35,7 | 4,29 |
| 0,20 | 0,0314 | 0,279 | 548 | (0,83) | 0,541 | 4,81 | 31,8 | 2,44 | 4,68 | 41,6 | 3,68 |
| 0,21 | 0,0346 | 0,308 | 497 | 0,86 | 0,581 | 5,16 | 29,6 | 2,63 | 5,43 | 48,3 | 3,17 |
| 0,23 | 0,0415 | 0,369 | 415 | (0,90) | 0,636 | 5,66 | 27,0 | 2,83 | 6,29 | 55,9 | 2,73 |
| 0,25 | 0,0491 | 0,436 | 351 | 0,93 | 0,679 | 6,04 | 25,3 | 3,05 | 7,31 | 65,0 | 2,35 |
| 0,27 | 0,0573 | 0,509 | 300 | (0,96) | 0,724 | 6,43 | 23,8 | 3,28 | 8,45 | 75,1 | 2,04 |
| 0,29 | 0,0661 | 0,587 | 260 | 1,00 | 0,785 | 6,98 | 21,9 | 3,53 | 9,79 | 87,0 | 1,758 |
| 0,31 | 0,0755 | 0,671 | 228 | (1,04) | 0,849 | 7,55 | 20,3 | 3,80 | 11,34 | 100,8 | 1,518 |
| 0,33 | 0,0855 | 0,760 | 201 | 1,08 | 0,916 | 8,14 | 18,79 | 4,10 | 13,20 | 117,4 | 1,303 |
| 0,35 | 0,0962 | 0,855 | 178,8 | (1,12) | 0,985 | 8,75 | 17,47 | 4,50 | 15,90 | 141,4 | 1,082 |
| 0,38 | 0,1134 | 1,008 | 151,8 | 1,16 | 1,057 | 9,40 | 16,28 | 4,80 | 18,10 | 160,9 | 0,951 |
| 0,41 | 0,1320 | 1,173 | 130,3 | (1,20) | 1,131 | 10,05 | 15,22 | 5,20 | 21,2 | 188,8 | 0,812 |
| 0,44 | 0,1521 | 1,352 | 113,2 | 1,25 | 1,227 | 10,91 | 14,02 | | | | |

Примечания. 1. До диаметра 0,10 *мм* включительно проводники изготовляются из твердотянутой меди с повышенным удельным сопротивлением. 2. Диаметры проводников в скобках являются мало употребительными.

**Медь обмоточная прямоугольная для изгото**

*А. Марки проводника*

ПБО — один слой хлопчатобумажной пряжи;
ПБД — два слоя хлопчатобумажной пряжи;
ПБОО — один слой хлопчатобумажной пряжи и одна хлопчатобумажная оплетка;
ПСД — два слоя стеклянной пряжи, пропитанной лаком;
ПДА — один слой асбестового волокна, подклеенного к меди и пропитанного лаком.

Примечания. Проводники марок ПСД и ПДА имеют толщину ± 0,05 *мм* в направлении меньшей стороны *a*. Начиная с размера боль равна 0,35 ± 0,05 *мм*.

*В. Номинальные размеры a и b [мм] и расчетные*

| b \ a | 0,90 | 1,00 | 1,08 | 1,16 | 1,25 | 1,35 | 1,45 | 1,56 | 1,68 | 1,81 | 1,95 | 2,10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,10 | 1,82 | 1,89 | 2,06 | 2,23 | 2,42 | 2,63 | 2,84 | 3,07 | 3,32 | 3,59 | **3,92** | 3,92 |
| 2,26 | 1,96 | 2,05 | 2,23 | 2,41 | 2,62 | 2,84 | 3,07 | 3,32 | 3,59 | 3,83 | **4,22** | **4,35** |
| 2,44 | 2,13 | 2,23 | 2,43 | 2,62 | 2,84 | 3,08 | 3,33 | 3,60 | 3,89 | 4,21 | 4,55 | 4,64 |
| 2,63 | 2,30 | 2,42 | 2,63 | 2,84 | 3,08 | 3,34 | 3,60 | 3,80 | 4,21 | 4,55 | 4,92 | 5,04 |
| 2,83 | 2,48 | 2,62 | 2,85 | 3,07 | 3,33 | 3,61 | 3,89 | 4,20 | 4,54 | 4,91 | 5,31 | 5,46 |
| 3,05 | — | 2,84 | 3,08 | 3,33 | 3,60 | 3,91 | 4,21 | 4,55 | 4,91 | 5,31 | 5,74 | 5,93 |
| 3,28 | — | 3,07 | 3,33 | 3,60 | 3,89 | 4,22 | 4,55 | 4,91 | 5,30 | 5,73 | 6,19 | 6,41 |
| 3,53 | — | 3,32 | 3,60 | 3,89 | 4,20 | 4,56 | 4,91 | 5,30 | 5,72 | 6,18 | 6,67 | 6,93 |
| 3,80 | — | 3,59 | 3,89 | 4,20 | 4,54 | 4,92 | 5,30 | 5,72 | 6,17 | 6,67 | 7,20 | 7,50 |
| 4,1 | — | 3,89 | 4,22 | 4,55 | 4,92 | 5,33 | 5,74 | 6,19 | 6,68 | 7,21 | 7,79 | 8,13 |
| 4,4 | — | 4,19 | 4,54 | 4,89 | 5,29 | 5,73 | 6,17 | 6,65 | 7,18 | 7,75 | 8,37 | 8,76 |
| 4,7 | — | 4,49 | 4,87 | 5,24 | 5,67 | 6,14 | 6,61 | 7,12 | 7,79 | 8,30 | 8,96 | 9,39 |
| 5,1 | — | 4,89 | 5,30 | 5,71 | 6,17 | 6,68 | 7,19 | 7,75 | 8,36 | 9,02 | 9,74 | 10,20 |
| 5,5 | — | 5,29 | 5,73 | 6,17 | 6,67 | 7,22 | 7,77 | 8,37 | 9,03 | 9,75 | 10,50 | 11,10 |
| 5,9 | — | 5,69 | 6,16 | 6,63 | 7,17 | 7,76 | 8,35 | 8,99 | 9,70 | 10,50 | 11,30 | 11,90 |
| 6,4 | — | 6,19 | 6,70 | 7,21 | 7,79 | 8,43 | 9,07 | 9,77 | 10,60 | 11,40 | 12,30 | 12,90 |
| 6,9 | — | 6,69 | 7,24 | 7,79 | 8,42 | 9,11 | 9,79 | 10,60 | 11,40 | 12,30 | 13,30 | 14,00 |
| 7,4 | — | 7,19 | 7,78 | 8,37 | 9,04 | 9,78 | 10,50 | 11,30 | 12,60 | 13,30 | 14,20 | 15,00 |
| 8,0 | — | 7,79 | 8,43 | 9,07 | 9,79 | 10,60 | 11,40 | 12,30 | 13,20 | 14,40 | 15,40 | 16,30 |
| 8,6 | — | 8,39 | 9,08 | 9,77 | 10,60 | 11,40 | 12,30 | 13,20 | 14,20 | 15,50 | 16,60 | 17,60 |
| 9,3 | — | — | — | — | — | 12,40 | 13,30 | 14,30 | 15,40 | 16,60 | 17,90 | 19,00 |
| 10,0 | — | — | — | — | — | — | — | 15,40 | 16,60 | 17,90 | 19,30 | 20,5 |
| 10,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 19,30 | 20,90 | 22,2 |
| 11,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 23,9 |
| 12,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 25,8 |
| 13,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечания. 1. Расчетные сечения даны с учетом закругления
2. Жирной чертой ограничена область поставки проводника марки
3. Сечения, показанные жирным шрифтом, выпускаются только мар

**вления изолированных обмоточных проводов**

*Б. Двухсторонняя толщина изоляции проводников различных марок*

| Марка | Меньшая сторона сечения *a* [*мм*] | | |
|---|---|---|---|
| | 0,9—1,95 | 2,1—3,8 | 4,1—5,5 |
| ПБО | 0,14 | 0,175 | 0,23 |
| ПБД | 0,27 | 0,33 | 0,44 |
| ПБОО | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| ПСД | 0,30 ± 0,05 | 0,30 ± 0,05 | 0,30 ± 0,05 |
| ПДА | 0,30 ± 0,05 | 0,30 ± 0,05 | 0,30 ± 0,05 |

изоляции 0,3 ± 0,05 *мм* только в направлении большей стороны *b* и 0,35 ±
шей стороны *b* = 6,4 *мм*, толщина изоляции в направлениях обеих сторон

*сечения q* [*мм*²] *меди обмоточной прямоугольной*

| 2,26 | 2,44 | 2,63 | 2,83 | 3,05 | 3,28 | 3,53 | 3,80 | 4,10 | 4,40 | 4,70 | 5,10 | 5,50 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4,63 | | | | | | | | | | | | |
| **5,10** | 5,37 | | | | | | | | | | | |
| **5,48** | 5,94 | 6,44 | | | | | | | | | | |
| 5,92 | 6,43 | **6,92** | 7,53 | | | | | | | | | |
| 6,41 | 6,96 | 7,54 | 8,15 | 8,72 | | | | | | | | |
| 6,93 | 7,52 | 8,15 | 8,80 | **9,52** | 10,3 | | | | | | | |
| 7,50 | 8,13 | 8,80 | 9,51 | 10,30 | 11,1 | 12,0 | | | | | | |
| 8,11 | 8,79 | 9,51 | 10,30 | 11,10 | 12,0 | **12,9** | 13,9 | | | | | |
| 8,79 | 9,52 | 10,30 | 11,10 | 12,00 | 13,0 | 14,0 | 15,1 | 15,9 | | | | |
| 9,46 | 10,20 | 11,10 | 12,00 | 12,90 | 13,9 | 15,0 | 16,2 | 17,1 | 18,5 | | | |
| 10,10 | 11,00 | 11,90 | 12,80 | 13,80 | 14,9 | 16,1 | 17,4 | 18,4 | **19,3** | **20,8** | | |
| 11,00 | 11,90 | 12,90 | 13,90 | 15,10 | 16,2 | 17,5 | 18,9 | 20,0 | 21,5 | **22,6** | 25,1 | |
| 11,90 | 12,90 | 14,00 | 15,10 | 16,30 | 17,5 | 18,9 | 20,4 | 21,7 | 23,3 | 25,0 | 27,2 | |
| 12,80 | 13,90 | 15,00 | 16,20 | 17,50 | 18,9 | 20,3 | 21,9 | 23,3 | 25,1 | 26,8 | 29,2 | |
| 14,00 | 15,10 | 16,30 | 17,60 | 19,00 | 20,5 | 22,1 | 23,8 | 25,3 | 27,3 | 29,2 | 31,7 | 34,3 |
| 15,10 | 16,30 | 17,70 | 19,00 | 20,6 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | 27,4 | 29,5 | 31,5 | 34,3 | 37,1 |
| 16,20 | 17,60 | 19,00 | 20,4 | 22,1 | 23,6 | 25,6 | 27,6 | 29,4 | 31,7 | 33,9 | 36,8 | 39,8 |
| 17,60 | 19,00 | 20,5 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | 27,7 | 29,9 | 31,9 | 34,3 | 36,7 | 39,9 | 43,1 |
| 18,90 | 20,5 | 22,1 | 23,8 | 25,7 | 27,7 | 29,9 | 32,2 | 34,4 | 36,9 | 39,5 | 43,0 | 46,4 |
| 20,5 | 22,3 | 24,0 | 25,8 | 27,9 | 30,0 | 32,3 | 34,8 | 37,2 | 40,0 | 42,8 | 46,5 | 50,3 |
| 22,1 | 23,9 | 25,8 | 27,8 | 30,0 | 32,3 | 34,8 | 37,5 | 40,1 | 43,1 | 46,1 | 50,1 | 54,1 |
| 23,9 | 25,9 | 27,9 | 30,1 | 32,4 | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,4 | 46,6 | 49,9 | 54,2 | 58,5 |
| 25,7 | 27,8 | 30,0 | 32,3 | 34,9 | 37,5 | 40,5 | 43,6 | 46,7 | 50,1 | 53,6 | 58,3 | 62,9 |
| 27,8 | 30,0 | 32,4 | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,6 | 47,0 | 50,4 | 54,1 | 57,9 | 62,9 | 67,9 |
| — | 32,4 | 35,0 | 37,7 | 40,7 | 43,8 | 47,2 | 50,8 | 54,5 | 58,5 | 62,6 | 68,0 | 73,4 |
| — | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 43,7 | 47,1 | 50,6 | 54,6 | 58,6 | 62,9 | 67,3 | 74,1 | 78,9 |

углов поперечных сечений.
ПДА.
ки ПДА.

## ОБРАЗЦЫ ИЗОЛЯЦИИ ПАЗОВЫХ И

### 1. *Для средних машин до 250 в и*

| Пазовая часть | Позиции | Наименование |
|---|---|---|
| | 1 | Разбухание изоляции проводников от пропитки . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . |
| | 2 | Прокладки между витками — картон электроизоляционный 0,2 . . . . . . . . . . . |
| | 3 | Изоляция катушки—лакоткань 0,2· до 250 *в*— в $1^1{}_{,4}$ слоя, от 250 до 500 *в* — в $2^1{}_4$ слоя с перекроем по широкой стороне . . . . . |
| | 4 | Изоляция катушки — лента миткалевая 0,15 впритык 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . . |
| | 5 | Разбухание ленты поз. 4 от пропитки . . . |
| | 6 | Изоляция паза — картон электроизоляционный 0,15 в $1^1/_4$ слоя . . . . . . . . . . . |
| | 7 | Прокладка между слоями — картон электроизоляционный 0,5 . . . . . . . . . . |
| | 8 | Прокладка под клин — картон электроизоляционный 0,3 . . . . . . . . . . . . . . |
| | 9 | Зазор на укладку не менее . . . . . . . |
| Рис 1а | | Всего . . |



| Лобовая часть | Поз. | Наименование |
|---|---|---|
| | 10 | Разбухание изоляции проводников от пропитки . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . |
| | 11 | Изоляция катушки — лента миткалевая 0,15 в $^1{}_2$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . |
| | 12 | Разбухание ленты поз. 11 от пропитки . . |
| Рис 1б | | Всего . . . |

**ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ**

**от 250 до 500 *в*. Медь ПБД**

| До 250 *в* | | | | От 250 до 500 *в* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| по ширине | | по высоте | | по ширине | | по высоте | |
| число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* |
| — | $0,10u$ | $n$ | $0,20n$ | — | $0,10u$ | $n$ | $0,20n$ |
| — | — | $n-1$ | $0,20(n-1)$ | — | — | $n-1$ | $0,20(n-1)$ |
| 3 | 0,60 | 4 | 0,80 | 5 | 1,00 | 8 | 1,60 |
| 2<br>— | 0,30<br>0,10 | 4<br>— | 0,60<br>0,20 | 2<br>— | 0,30<br>0,10 | 4<br>— | 0,60<br>0,20 |
| 2 | 0,30 | 3 | 0,45 | 2 | 0,30 | 3 | 0,45 |
| — | — | 1 | 0,50 | — | — | 1 | 0,50 |
| —<br>— | —<br>0,30 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 | —<br>— | —<br>0,30 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 |
| $1,60+0,1u$ | | $3,25+0,2(2n-1)$ | | $2,00+0,1u$ | | $4,05+0,2(2n-1)$ | |

| На 2 стороны | | На 2 стороны | |
|---|---|---|---|
| число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* |
| — | $0,10u$ | — | $0,10u$ |
| 4<br>— | 0,60<br>0,20 | 4<br>— | 0,60<br>0,20 |
| | $0,80+0,1u$ | | $0,80+0,1u$ |

**2. Для средних машин до 250 *в* и от**

| Пазовая часть | Позиции | Наименование |
|---|---|---|
| Рис. 2а | 1 | Изоляция проводников (если медь голая) — лента миткалевая 0,15 в 1/2 нахлеста 1 ряд |
| | 2 | Изоляция катушки — до 250 *в* лакоткань 0,2, от 250 до 500 *в* — микафолий 0,35 в 1 1/4 слоя с перекроем по узкой стороне . . . |
| | 3 | Изоляция катушки — лента тафтяная 0,18 в 1/2 нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . |
| | 4 | Изоляция паза — картон электроизоляционный 0,2 в 1 1/4 слоя . . . . . . . . . . . |
| | 5 | Зазор на укладку не менее . . . . . . . . |
| | | Всего . . . |

| Лобовая часть | Поз. | Наименование |
|---|---|---|
| Рис. 2б | 6 | Изоляция проводников (если медь голая) — лента миткалевая 0,15 в 1/2 нахлеста 1 ряд |
| | 7 | Разбухание ленты поз. 6 от пропитки . . . |
| | 8 | Изоляция катушки — лента тафтяная 0,18 в 1/2 нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . |
| | 9 | Разбухание ленты поз. 8 от пропитки . . . |
| | | Всего . . . |

**250 до 500 *в*. Медь голая или ПБД**

| До 250 *в* | | | | От 250 до 500 *в* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| по ширине | | по высоте | | по ширине | | по высоте | |
| число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* |
| 4*и* | 0,60*и* | 8 | 1,20 | 4*и* | 0,60*и* | 8 | 1,20 |
| 2 | 0,40 | 6 | 1,20 | 2 | 0,70 | 6 | 2,10 |
| 4 | 0,72 | 8 | 1,44 | 4 | 0,72 | 8 | 1,44 |
| 2 | 0,40 | 3 | 0,60 | 2 | 0,40 | 3 | 0,60 |
| — | 0,30 | — | 0,40 | — | 0,30 | — | 0,40 |
| 1,82 + 0,6*и* | | 3,64 + 1,20 | | 2,12 + 0,6*и* | | 4,54 + 1,20 | |

| На 2 стороны | | На 2 стороны | |
|---|---|---|---|
| **число слоев** | **общая толщина, *мм*** | число слоев | общая толщина, *мм* |
| 4*и* | 0,60*и* | 4*и* | 0,60*и* |
| — | 0,20*и* | — | 0,20*и* |
| 4 | 0,72 | 4 | 0,72 |
| — | 0,24 | — | 0,24 |
| — | 0,96 + 0,8*и* | — | 0,96 + 0,8*и* |

### 3. Для средних и крупных машин до 500 *в*

| Пазовая часть | Позиции | Наименование | |
|---|---|---|---|
| | 1 | Изоляция секций — микалента 0,13 в $^{1}/_{2}$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . . | |
| | 2 | Подмазка микаленты лаком . . . . . . . . | |
| | 3 | Изоляция катушки — микафолий 0,12. до 500 *в* — в $2^{1}/_{4}$ слоя, от 500 до 1000 *в* — в $4^{1}/_{4}$ слоя с перекроем по широкой стороне . . | |
| | 4 | Изоляция катушки — бумага телефонная лакированная 0,07 в $1^{1}/_{4}$ слоя . . . . . . . | |
| | 5 | Изоляция катушки — картон электроизоляционный 0,2 в $1^{1}/_{4}$ слоя . . . . . . . . . | |
| | 6 | Прокладка на дно паза — картон электроизоляционный 0,3 . . . . . . . . . . . . | |
| | 7 | Зазор на укладку не менее . . . . . . . . | |
| Рис. 3а | | Всего . . . | |

| Лобовая часть | Поз. | Наименование | |
|---|---|---|---|
| | 8 | Изоляция секций — микалента 0,13 в $^{1}/_{2}$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . . | |
| | 9 | Изоляция катушки — микалента 0,13 в $^{1}/_{2}$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . | |
| | 10 | Изоляция катушки — лента тафтяная 0,18 в $^{1}/_{2}$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . | |
| | 11 | Лакировка . . . . . . . . . . . . . . . . | |
| Рис. 3б | | Всего . . . | |

**и от 500 до 1000 *в*. Медь голая**

| До 500 *в* | | | | От 500 до 1000 *в* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| по ширине | | по высоте | | по ширине | | по высоте | |
| число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* |
| 4*и*<br>— | 0,52*и*<br>0,05*и* | 8<br>— | 1,04<br>0,10 | 4*и*<br>— | 0,52*и*<br>0,05*и* | 8<br>— | 1,04<br>0,10 |
| 5 | 0,60 | 8 | 0,96 | 9 | 1,08 | 16 | 1,92 |
| 2 | 0,14 | 6 | 0,42 | 2 | 0,14 | 6 | 0,42 |
| 2 | 0,40 | 6 | 1,20 | 2 | 0,40 | 6 | 1,20 |
| —<br>— | —<br>0,20 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 | —<br>— | —<br>0,20 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 |
| 1,34 + 0,57*и* | | 4,42 | | 1,82 + 0,57*и* | | 5,38 | |

| На 2 стороны | | На 2 стороны | |
|---|---|---|---|
| число слоев | общая толщина, *мм* | число слоев | общая толщина, *мм* |
| 4*и* | 0,52*и* | 4*и* | 0,52*и* |
| — | — | 4 | 0,52 |
| 4<br>— | 0,72<br>0,10 | 4<br>— | 0,72<br>0,10 |
| — | 0,82 + 0,52*и* | — | 1,34 + 0,52*и* |

## 4. Непрерывная для крупных машин до

Пазовая часть

Рис. 4а

| Позиции | Наименование | |
|---|---|---|
| 1 | Изоляция отдельных сечений (если $c > 1$) — лак 0,025 . . . . . . . . . . . . . . . . | |
| 2 | Изоляция секций — микалента 0,13 в $1/2$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . | |
| 3 | Подмазка микаленты лаком . . . . . . . . | |
| 4 | Скрепление катушки — лента батистовая 0,12 вразбежку 1 ряд . . . . . . . . . . . . | |
| 5 | Изоляция катушки — микалента 0,13 в $1/2$ нахлеста: до 250 *в* — 2 ряда, от 250 до 1000 *в* — 3 ряда . . . . . . . . . . . . . . . . . | |
| 6 | Изоляция катушки — лента миткалевая 0,15 впритык 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . | |
| 7 | Изоляция паза — картон электроизоляционный повышенного качества 0,15 в $1\frac{1}{4}$ слоя | |
| 8 | Прокладка между слоями — картон электроизоляционный 0,3 . . . . . . . . . . . | |
| 9 | Прокладка на дно паза — картон электроизоляционный 0,3 . . . . . . . . . . . . | |
| 10 | Прокладка под клин — картон электроизоляционный 0,3 . . . . . . . . . . . . . . | |
| 11 | Зазор на укладку не менее . . . . . . . . | |
| | Всего . . . | |

Лобовая часть

Рис. 4б

| Поз. | Наименование | |
|---|---|---|
| 12 | Изоляция отдельных сечений (если $c > 1$) — лак 0,025 . . . . . . . . . . . . . . . . | |
| 13 | Изоляция секций — микалента 0,13 в $1/2$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . . . . | |
| 14 | Скрепление катушки — лента батистовая 0,12 вразбежку 1 ряд . . . . . . . . . . . . | |
| 15 | Изоляция катушки — микалента 0,13 в $1/2$ нахлеста: до 250 *в* — 1 ряд, от 250 до 1000 *в* — 2 ряда . . . . . . . . . . . . . . . . . . | |
| 16 | Изоляция катушки — лента миткалевая 0,15 в $1/2$ нахлеста 1 ряд . . . . . . . . . . . | |
| 17 | Разбухание от пропитки . . . . . . . . . | |
| | Всего . . . | |

**250 в и от 250 до 1000 в. Медь голая**

| До 250 в | | | | От 250 до 1000 в | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| по ширие | | по высоте | | по ширине | | по высоте | |
| число слоев | общая толщииа, мм | число слоев | общая толщина, мм | число слоев | общая толщина, мм | число слоев | общая толщина, мм |
| 2и | 0,05и | 2с | 0,10с | 2и | 0,05и | 2с | 0,10с |
| 4и<br>— | 0,52и<br>0,05и | 8<br>— | 1,04<br>0,10 | 4и<br>— | 0,52и<br>0,05и | 8<br>— | 1,04<br>0,10 |
| 2 | 0,24 | 4 | 0,48 | 2 | 0,24 | 4 | 0,48 |
| 8 | 1,04 | 16 | 2,08 | 12 | 1,56 | 24 | 3,12 |
| 2 | 0,30 | 4 | 0,60 | 2 | 0,30 | 4 | 0,60 |
| 2 | 0,30 | 3 | 0,45 | 2 | 0,30 | 3 | 0,45 |
| — | — | 1 | 0,30 | — | — | 1 | 0,30 |
| — | — | 1 | 0,30 | — | — | 1 | 0,30 |
| —<br>— | —<br>0,35 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 | —<br>— | —<br>0,35 | 1<br>— | 0,30<br>0,40 |
| 2,23 + 0,62и | | 6,05 + 0,1с | | 2,75 + 0,62и | | 7,09 + 0,1с | |

| На 2 стороны | | На 2 стороны | |
|---|---|---|---|
| число слоев | общая толщина, мм | число слоев | общая толщина, мм |
| 2и | 0,05и | 2и | 0,05и |
| 4и | 0,52и | 4и | 0,52и |
| 2 | 0,24 | 2 | 0,24 |
| 4 | 0,52 | 8 | 1,08 |
| 4<br>— | 0,60<br>0,25 | 4<br>— | 0,60<br>0,25 |
| — | 1,61 + 0,57и | — | 2,17 + 0,57и |

**Рекомендуемые значения плотностей тока и линейных нагрузок для машин без компенсационных обмоток**

| № п. п. | Категория машин | Плотность тока, *а/мм²* | | | | Линейная нагрузка *AS*, *а/см* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | в обмотке якоря, $s_я$ | в параллельной обмотке, $s_ш$ | в последовательной обмотке, $s_c$ | в добавочных полюсах, $s_д$ | |
| 1 | Машины мощностью от 0,5 до 200 *квт* при скорости вращения от 750 до 1500 *об мин* в открытом или защищенном исполнении с вентилятором на валу . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 4,5—5,5 | 2—2,5 | 2,5—3 | 3—3,5 | 0,8—1,2 *D** |
| 2 | Машины мощностью от 200 до 1000 *квт* при скорости вращения от 500 до 1000 *об мин* в открытом исполнении с самовентиляцией . . . . . . | 4—5,5 | 1,8—2,5 | 2—3 | 2,5—3,5 | 350—450 |
| 3 | Машины мощностью до 500 *квт* при скорости вращения от 100 до 400 *об мин* в открытом исполнении . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 3,5—4,5 | 1,5—2 | 2—2,5 | 2,5—3 | 300—400 |
| 4 | Машины малой мощности с диаметром якоря до 150 *мм* в закрытом исполнении без обдува поверхности ** . . . . . . . . . . . . . . . . . | 2,5—4 | 1,5—2 | 1,5—2 | 2—3 | — |
| 5 | Машины с диаметром якоря до 500 *мм* в закрытом исполнении без обдува поверхности ** . . . | 1,5—2,5 | 1—1,5 | 1—1,5 | 1,2—2 | — |

* *D* — диаметр якоря в *мм*.

** Меньшие значения плотностей тока при бóльших диаметрах, бóльшие — при меньших диаметрах.

**Характеристики намагничения различных магнитных материалов в ампер-витках на 1 *см* длины**

*А. Листовая электротехническая **сталь** толщиной **0**,5 мм*

| *B* (*гс*) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3000 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 |
| 4000 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| 5000 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 6000 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,9 |
| 7000 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 |
| 8000 | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 |
| 9000 | 2,9 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 |
| 10000 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,6 |
| 11000 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,3 | 5,4 | 5,6 | 5,7 | 5,9 |
| 12000 | 6,1 | 6,3 | 6,5 | 6,7 | 6,9 | 7,1 | 7,3 | 7,5 | 7,7 | 8,0 |
| 13000 | 8,3 | 8,6 | 8,9 | 9,2 | 9,6 | 10,0 | 10,4 | 10,7 | 11,2 | 11,7 |
| 14000 | 12,2 | 12,8 | 13,4 | 14,1 | 14,7 | 15,3 | 16,0 | 16,7 | 17,4 | 18,3 |
| 15000 | 19,3 | 20,4 | 21,6 | 22,8 | 24,1 | 25,5 | 26,9 | 28,4 | 31,0 | 33,0 |
| 16000 | 35 | 37 | 39 | 41 | 43 | 46 | 49 | 52 | 55 | 58 |
| 17000 | 61 | 65 | 69 | 73 | 77 | 82 | 87 | 92 | 97 | 102 |
| 18000 | 108 | 114 | 120 | 126 | 133 | 140 | 147 | 154 | 162 | 171 |
| 19000 | 180 | 190 | 200 | 211 | 222 | 234 | 246 | 258 | 271 | 285 |
| 20000 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 445 | 470 | 495 |
| 21000 | 525 | 555 | 590 | 630 | 670 | 720 | 770 | 830 | 900 | 970 |
| 22000 | 1040 | 1120 | 1200 | 1290 | 1380 | 1480 | 1580 | 1680 | 1790 | 1910 |
| 23000 | 2030 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*Б. Листовая электротехническая сталь — только для зубцов якоря*

| B [гс] | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14000 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,1 | 14,6 | 15,2 | 15,9 | 16,6 | 17,4 |
| 15000 | 18,2 | 19,1 | 20,1 | 21,2 | 22,3 | 23,6 | 25,0 | 26,5 | 28,2 | 30,0 |
| 16000 | 32 | 34 | 36 | 38 | 41 | 43 | 46 | 49 | 52 | 55 |
| 17000 | 58 | 61 | 64 | 67 | 70 | 74 | 78 | 82 | 87 | 92 |
| 18000 | 97 | 102 | 108 | 113 | 119 | 125 | 131 | 137 | 143 | 149 |
| 19000 | 155 | 161 | 168 | 175 | 182 | 189 | 196 | 204 | 212 | 221 |
| 20000 | 230 | 239 | 248 | 257 | 266 | 276 | 287 | 300 | 315 | 330 |
| 21000 | 345 | 365 | 385 | 405 | 425 | 450 | 475 | 500 | 530 | 560 |
| 22000 | 590 | 620 | 650 | 680 | 715 | 750 | 785 | 820 | 855 | 890 |
| 23000 | 925 | 960 | 1000 | 1030 | 1070 | 1100 | 1140 | 1170 | 1210 | 1240 |
| 24000 | 1280 | 1310 | 1350 | 1380 | 1420 | 1450 | 1490 | 1530 | 1560 | 1600 |
| 25000 | 1640 | 1680 | 1710 | 1750 | 1790 | 1830 | 1870 | 1900 | 1940 | 1980 |
| 26000 | 2020 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. При индукциях ниже 14000 *гс* пользоваться таблицей А.

*В. Листовая сталь толщиной 1,0 и 1,5 мм для полюсов*

| B [гс] | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6000 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,5 |
| 7000 | 3,6 | 3,6 | 3,7 | 3,7 | 3,8 | 3,8 | 3,9 | 3,9 | 4,0 | 4,0 |
| 8000 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 |
| 9000 | 4,9 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 5,4 | 5,5 | 5,6 |
| 10000 | 5,7 | 5,8 | 5,9 | 6,0 | 6,1 | 6,2 | 6,3 | 6,5 | 6,6 | 6,7 |
| 11000 | 6,9 | 7,0 | 7,2 | 7,3 | 7,5 | 7.6 | 7,8 | 8,0 | 8,1 | 8,3 |
| 12000 | 8,5 | 8,7 | 8,9 | 9,1 | 9,3 | 9,5 | 9,7 | 9,9 | 10,1 | 10,4 |
| 13000 | 10,7 | 11,0 | 11,3 | 11,6 | 12,0 | 12,4 | 12,8 | 13,2 | 13,7 | 14,2 |
| 14000 | 14,7 | 15,2 | 15,8 | 16,4 | 17,1 | 17,9 | 18,7 | 19,5 | 20,4 | 21,4 |
| 15000 | 22,5 | 23,6 | 24,8 | 26,1 | 27,5 | 29,0 | 30,5 | 32,5 | 34,5 | 37,0 |
| 16000 | 39 | 42 | 44 | 47 | 50 | 53 | 56 | 59 | 63 | 67 |
| 17000 | 71 | 75 | 79 | 84 | 89 | 94 | 99 | 104 | 110 | 116 |
| 18000 | 122 | 128 | 135 | 142 | 150 | 158 | 166 | 174 | 183 | 192 |
| 19000 | 201 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*Г. Литая сталь*

| *B* [*гс*] | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3000 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 |
| 4000 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 3,5 |
| 5000 | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,4 |
| 6000 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,4 |
| 7000 | 5,5 | 5,6 | 5,7 | 5,8 | 5,9 | 6,0 | 6,1 | 6,3 | 6,4 | 6,5 |
| 8000 | 6,6 | 6,7 | 6,8 | 6,9 | 7,0 | 7,2 | 7,3 | 7,4 | 7,5 | 7,6 |
| 9000 | 7,8 | 7,9 | 8,0 | 8,1 | 8,3 | 8,4 | 8,5 | 8,7 | 8,8 | 8,9 |
| 10000 | 9,1 | 9,2 | 9,4 | 9,5 | 9,7 | 9,8 | 10,0 | 10,1 | 10,3 | 10,4 |
| 11000 | 10,6 | 10,8 | 11,0 | 11,2 | 11,4 | 11,6 | 11,8 | 12,0 | 12,2 | 12,4 |
| 12000 | 12,7 | 13,0 | 13,2 | 13,6 | 13,9 | 14,2 | 14,6 | 15,0 | 15,4 | 15,8 |
| 13000 | 16,2 | 16,7 | 17,2 | 17,7 | 18,2 | 18,8 | 19,4 | 20,0 | 20,6 | 21,3 |
| 14000 | 22,0 | 22,7 | 23,5 | 24,3 | 25,1 | 26,0 | 26,9 | 27,9 | 28,9 | 30,0 |
| 15000 | 31,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

*Д. Чугун*

| *B* [*гс*] | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3000 | 12 | 12 | 13 | 13 | 14 | 14 | 15 | 15 | 16 | 16 |
| 4000 | 17 | 17 | 18 | 18 | 19 | 19 | 20 | 20 | 21 | 51 |
| 5000 | 22 | 22 | 23 | 23 | 24 | 25 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| 6000 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| 7000 | 39 | 40 | 41 | 42 | 44 | 45 | 47 | 48 | 50 | 51 |
| 8000 | 53 | 55 | 57 | 59 | 61 | 63 | 65 | 67 | 69 | 72 |
| 9000 | 75 | 78 | 81 | 84 | 87 | 90 | 93 | 96 | 99 | 102 |
| 10000 | 106 | 110 | 114 | 118 | 122 | 126 | 130 | 134 | 138 | 142 |
| 11000 | 147 | 152 | 157 | 162 | 167 | 173 | 179 | 185 | 191 | 197 |
| 12000 | 203 | 209 | 216 | 223 | 230 | 237 | 244 | 251 | 259 | 267 |
| 13000 | 275 | 283 | 291 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 |
| 14000 | 370 | 380 | 390 | 400 | 410 | 420 | 435 | 445 | 460 | 470 |
| 15000 | 485 |  |  | — | — | — | — | — | — | — |

**Основные физические показатели щеток для электрических машин (извлечение из ГОСТ 2332—43).**

| Группа | Марка | Номинальная плотность тока, *а см²* | Наибольшая окружная скорость, *м сек* | Удельное нажатие, *г см²* | Удельное электросопротивление, *ом · мм² м* | Твердость | | Переходное падение напряжения при номинальном токе, *в** | Коэффициент трения при скорости 15 *м,сек* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | по Шору | по Бринеллю | | |
| Угольно-графитные | Т2,Т6 | 6 | 10 | 200—250 | 40—60 | 45—58 | — | 2,0±0,5 | 0,30 |
| | УГ2 | 8 | 15 | 200—250 | 18—30 | 40—60 | — | 2,0±0,4 | 0,25 |
| | УГ4 | 7 | 12 | 200—250 | 26—38 | 45—65 | — | 2,1±0,5 | 0,25 |
| Графитные | Г1 | 7 | 12 | 200—250 | 30—46 | 35—50 | — | 2,2±0,5 | 0,30 |
| | Г2 | 8 | 15 | 200—250 | 25—37 | 40—50 | — | 1,7±0,5 | 0,25 |
| | Г3 | 10—11 | 25 | 200—250 | 10—20 | 30—40 | — | 1,9±0,4 | 0,25 |
| | Г6 | 9 | 18 | 200—250 | 26—42 | 35—50 | — | 2,2±0,6 | 0,25 |
| | Г8 | 11 | 25 | 200—250 | 10—20 | 20—40 | — | 1,9±0,4 | 0,25 |
| | Г58 | 9 | 25 | 175—200 | 20—30 | 35—50 | — | — | 0,25 |
| Электрографитированные | ЭГ2 | 10 | 25 | 200—250 | 20—30 | 46—60 | — | 2,75±0,6 | 0,20 |
| | ЭГ4 | 12 | 40 | 150—200 | 10—16 | 20—30 | — | 2,0 ±0,4 | 0,20 |
| | ЭГ6 | 9 | — | 200—250 | 30—46 | 47—63 | — | 2,5 ±0,6 | 0,25 |
| | ЭГ8 | 10 | 40 | 200—400 | 40—50 | 42—55 | — | 2,4 ±0,5 | 0,25 |
| | ЭГ10 | 9 | — | 200—250 | 40—56 | 50—70 | — | 2,4 ±0,6 | 0,25 |
| | ЭГ14 | 10—11 | 40 | 200—400 | 26—38 | 40—60 | — | 2,5 ±0,5 | 0,25 |
| | ЭГ83 | 9 | 45 | 175—220 | 35—65 | 15—32 | — | — | 0,25 |

*Продолжение*

| Группа | Марка | Номинальная плотность тока, *а см²* | Наибольшая окружная скорость, *м сек* | Удельное нажатие, *г см²* | Удельное электросопротивление, *ом · мм²/м* | Твердость | | Переходное падение напряжения при номинальном токе, *в* * | Коэффициент трения при скорости 15 *м сек* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | по Шору | по Бринеллю | | |
| Меднографитные | М1 | 15 | 25 | 150—200 | 2—6 | 26—38 | — | 1,5±0,5 | 0,25 |
| | М3 | 12 | 20 | 150—200 | 7—12 | 30—40 | — | 1,8±0,4 | 0,25 |
| | М6 | 15 | 25 | 150—200 | 2—6 | 26—35 | — | 1,5±0,5 | 0,20 |
| | М16 | 12—14 | 25 | 150—200 | 0,5—1,5 | 20—30 | — | 0,9±0,3 | 0,25 |
| | М20 | 12 | 20 | 150—200 | 5—13 | 24—36 | — | 1,4±0,4 | 0,25 |
| | М22 | 11—14 | 25 | 150—200 | 1—4 | 20—30 | — | 1,2±0,3 | 0,20 |
| | М24 | 20 | 15 | 175—200 | 0,1—0,3 | — | 6—12 | 0,5±0,2 | 0,25 |
| | МГ1 | 20 | 20 | 180—230 | 0,05—0,15 | — | 6—18 | 0,2±0,1 | 0,20 |
| | МГ2 | 20 | 20 | 180—230 | 0,15—0,35 | — | 6—14 | 0,5±0,2 | 0,20 |
| | МГ4 | 15 | 20 | 200—250 | 0,3—1,3 | 22—32 | — | 1,1±0,5 | 0,20 |
| | МГ6 | 18 | 20 | 200—250 | 0,3—1,3 | 18—30 | — | 1,0±0,4 | 0,20 |
| Бронзографитные | БГ | 20 | 20 | 170—220 | 0,5—0,9 | — | 8—16 | 0,3±0,1 | 0,25 |

* Переходное падение напряжения дано на две полярности щеток ($2\Delta U$).

## Основные данные нормальных двигателей всесоюзной серии ПН

Извлечение из каталога электрооборудования № 1312, издание ЦБТИ МЭП, 1951

| Тип | Напряжение, *в* | Мощность, *квт* | Скорость вращения, *об/мин* | |
|---|---|---|---|---|
| | | | номинальная | наибольшая |
| ПН-2,5 | 110 | 0,70 | 2870 | 2870 |
| | | 0,25 | 1440 | 2870 |
| | 220 | 0,70 | 2870 | 2870 |
| | | 0,25 | 1440 | 2870 |
| ПН-5 | 110 | 1,00 | 2800 | 2800 |
| | | 0,75 | 2000 | 2500 |
| | | 0,52 | 1450 | 2000 |
| | | 0,30 | 960 | 1920 |
| | 220 | 1,00 | 2800 | 2800 |
| | | 0,75 | 2000 | 2500 |
| | | 0,52 | 1450 | 2000 |
| | | 0,30 | 960 | 1920 |
| ПН-10 | 110 | 2,40 | 2850 | 2850 |
| | | 1,60 | 2000 | 2600 |
| | | 1,00 | 1420 | 2500 |
| | | 0,65 | 980 | 1960 |
| | 220 | 2,40 | 2850 | 2850 |
| | | 1,60 | 2000 | 2600 |
| | | 1,00 | 1420 | 2500 |
| | | 0,65 | 980 | 1960 |
| | 440 | 1,00 | 1450 | 1800 |
| ПН-17,5 | 110 | 2,50 | 2000 | 2600 |
| | | 1,75 | 1450 | 2300 |
| | | 1,00 | 1000 | 2000 |
| | 220 | 3,70 | 2850 | 2850 |
| | | 2,70 | 2100 | 2700 |
| | | 1,75 | 1450 | 2300 |
| | | 1,00 | 1000 | 2000 |
| | 440 | 1,75 | 1450 | 1800 |

| Тип | Напряжение, *в* | Мощность, *квт* | Скорость вращения, *об/мин* | |
|---|---|---|---|---|
| | | | номинальная | наибольшая |
| ПН 28,5 | 110 | 4,2 | 2200 | 2400 |
| | | 2,8 | 1500 | 2200 |
| | | 1,6 | 1000 | 2000 |
| | 220 | 5,3 | 2800 | 2800 |
| | | 4,2 | 2200 | 2400 |
| | | 2,8 | 1500 | 2200 |
| | | 1,6 | 1000 | 2000 |
| | 440 | 1,6 | 1000 | 1500 |
| ПН-45 | 110 | 6,0 | 2000 | 2300 |
| | | 4,2 | 1400 | 2100 |
| | | 2,5 | 1000 | 1950 |
| | 220 | 6,6 | 2200 | 2400 |
| | | 4,2 | 1500 | 2100 |
| | | 2,5 | 1000 | 1950 |
| | 440 | 2,2 | 1000 | 1500 |
| ПН-68 | 110 | 6,5 | 1550 | 2000 |
| | | 3,7 | 1000 | 1750 |
| | 220 | 10,0 | 2250 | 2400 |
| | | 6,5 | 1550 | 2000 |
| | | 3,7 | 1000 | 1750 |
| | 440 | 3,7 | 1000 | 1500 |
| ПН-85 | 110 | 5,6 | 1000 | 1750 |
| | 220 | 9,0 | 1500 | 2000 |
| | | 5,6 | 1000 | 1750 |
| | 440 | 5,6 | 1000 | 1500 |
| ПН-100 | 110 | 15,0 | 1560 | 2100 |
| | | 9,5 | 1100 | 1900 |
| | | 5,8 | 800 | 1500 |
| | 220 | 15,0 | 1600 | 2000 |
| | | 10,0 | 1100 | 1900 |
| | | 5,8 | 800 | 1500 |
| | 440 | 8,0 | 1175 | 1500 |

| Тип | Напряжение, *в* | Мощность, *квт* | Скорость вращения, *об/мин*: номинальная | Скорость вращения, *об/мин*: наибольшая |
|---|---|---|---|---|
| ПН-145 | 110 | 13,5 | 1100 | 2000 |
| | | 8,5 | 800 | 1500 |
| | 220 | 21,0 | 1550 | 1900 |
| | | 13,5 | 1100 | 1800 |
| | | 8,5 | 800 | 1500 |
| | 440 | 13,5 | 1100 | 1500 |
| ПН-205 | 110 | 21,0 | 980 | 1600 |
| | | 14,5 | 770 | 1400 |
| | 220 | 34,0 | 1580 | 1900 |
| | | 21,0 | 980 | 1700 |
| | | 15,0 | 770 | 1500 |
| | 440 | 20,5 | 1000 | 1500 |
| ПН-290 | 110 | 19,0 | 770 | 1300 |
| | 220 | 46,5 | 1500 | 1800 |
| | | 29,0 | 1000 | 1600 |
| | | 19,0 | 770 | 1300 |
| | 440 | 29,0 | 1000 | 1500 |
| ПН 400 | 110 | 65 | 1450 | 1450 |
| | | 43 | 950 | 1250 |
| | | 22 | 580 | 1050 |
| | 220 | 68 | 1480 | 1900 |
| | | 43 | 950 | 1550 |
| | | 22 | 590 | 1150 |
| | 440 | 65 | 1480 | 1600 |
| | | 43 | 980 | 1500 |
| ПН-550 | 110 | 60 | 980 | 1400 |
| | | 30 | 600 | 1200 |
| | 220 | 92 | 1470 | 1470 |
| | | 60 | 980 | 1500 |
| | | 30 | 600 | 1200 |
| | 440 | 88 | 1470 | 1470 |
| | | 60 | 980 | 1500 |
| ПН-750 | 110 | 75 | 920 | 1400 |
| | | 40 | 600 | 1100 |
| | 220 | 110 | 1350 | 1450 |
| | | 75 | 900 | 1250 |
| | | 40 | 620 | 1200 |
| | 440 | 110 | 1400 | 1500 |
| | | 70 | 960 | 1400 |
| ПН-1000 | 110 | 70 | 750 | 1300 |
| | | 55 | 600 | 1000 |
| | 220 | 130 | 1170 | 1350 |
| | | 105 | 960 | 1300 |
| | | 70 | 750 | 1150 |
| | | 55 | 630 | 1180 |
| | 440 | 105 | 1000 | 1300 |
| | | 55 | 630 | 1100 |
| ПН-1320 | 110 | 95 | 750 | 1000 |
| | | 75 | 620 | 1050 |
| | 220 | 170 | 1250 | 1350 |
| | | 130 | 980 | 1300 |
| | | 88 | 720 | 1150 |
| | | 68 | 560 | 1050 |
| | 440 | 125 | 950 | 1350 |
| | | 88 | 750 | 1250 |
| ПН-1750 | 110 | 90 | 550 | 900 |
| | 220 | 200 | 1150 | 1250 |
| | | 165 | 970 | 1250 |
| | | 115 | 750 | 1350 |
| | | 80 | 550 | 1050 |
| | 440 | 150 | 1000 | 1300 |
| | | 110 | 750 | 1200 |

| (Наименование предприятия) | Расчет обмоток якоря и полюсов машины постоянного тока<br>типа — № — Завод-изготовитель *неизвестен*<br>Заказ № *789* Заказчик *Леспромхоз № 1*<br>Исполнение *защищенный с самовентиляцией* | Расчетный формуляр<br>№ *456*<br>Лист *1* Всего л |
|---|---|---|

| Номинальные данные | Режим работы | киловатт | вольт | ампер | об/мин | действие |
|---|---|---|---|---|---|---|
| до перемотки | | — | — | — | — | — |
| после перемотки | *генератор* | *110* | *115* | *955* | *800* | *продолжительно* |

**I Якорь**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | $D$ | 49,0 | см |
| 2 | $l_я$ | 19,0 | " |
| 3 | $Z$ | 63 | — |
| 4 | $b_п$ | 107 | мм |
| 5 | $h_п$ | 40,0 | " |
| 6 | $n_к$ | 24 | — |
| 7 | $b_к$ | — | см |
| 8 | $d_к$ | 30 | " |
| 9 | $D_в$ | 14,0 | " |
| 10 | $n_з$ | — | — |
| 11 | $h_з$ | — | см |
| 12 | $l_з$ | — | |
| 13 | $\Delta$ | 05 | мм |
| 14 | Изоляция | лак | |

**II Главные полюса**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 15 | $2p$ | 6 | — |
| 16 | $b_г$ | 151 | см |
| 17 | $b_г'$ | 120 | |
| 18 | $l_г$ | 19,0 | |
| 19 | $h_г$ | 13,15 | " |
| 20 | $\delta_г$ | 3,5 | мм |
| 21 | $\Delta$ | 10 | |
| 22 | Материал | сталь | |

**III Добавочн полюса**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 23 | $2p$ | 6 | — |
| 24 | $b_д$ | — | см |
| 25 | $b_д$ | 35 | " |
| 26 | $l_д$ | 190 | " |
| 27 | $h_д$ | 128 | " |
| 28 | $\delta_д$ | 70 | мм |

**IV Станина**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 29 | $D_с$ | 760 | см |
| 30 | $h_с$ | 30 | " |
| 31 | $l_с$ | 300 | " |
| 32 | Материал | сталь | |

**V Коллектор**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 33 | $D_к$ | 400 | см |
| 34 | $l_к$ | 20,0 | " |
| 35 | $K$ | 189 | |

**VI Обработка обмера**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 36 | $l$ | 190 | см |
| 37 | $k_0$ | 093 | — |
| 38 | $l_0$ | 1765 | см |
| 39 | $t_1$ | 2,44 | " |
| 40 | $t_2$ | 2,04 | " |
| 41 | $b_з$ | 11,0 | мм |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 42 | $h_m$ | 11,5 | см |
| 43 | $q_п$ | — | мм² |
| 44 | $Q_в$ | 287 | см² |
| 45 | $Q_з$ | 120 | " |
| 46 | $Q_m$ | 203 | " |
| 47 | $k_0$ | 0,95 | — |
| 48 | $Q_г$ | 217 | см² |
| 49 | $Q_с$ | 120 | " |
| 50 | $L_з$ | 8,0 | см |
| 51 | $L_m$ | 270 | " |
| 52 | $L_с$ | 414 | |

**VIII Обмотка якоря**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 53 | Тип | петлевая | |
| 54 | $2a$ | 6 | — |
| 55 | $u$ | 3 | — |
| 56 | $y_1$ | 30 | — |
| 57 | $y_2$ | 29 | — |
| 58 | $y$ | 1 | — |
| 59 | $n_y$ | 21 | — |
| 60 | $T$ | 224 | см |
| 61 | $N$ | 378 | — |

**X Мягкие секции**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 70 | Марка пров | | — |
| 71 | $c$ | — | — |
| 72 | $f$ | — | — |
| 73 | $q'$ | — | мм² |
| 74 | $d$ | — | мм |
| 75 | $d$ | — | " |
| 76 | $q$ | — | мм² |
| 77 | $K_н$ | — | — |
| 78 | $L$ | — | см |
| 79 | $l_л$ | — | " |

**XII Жесткие секции**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 80 | $B$ | 966 | мм |
| 81 | $H$ | 15,4 | " |
| 82 | $M$ | 20 | см |
| 83 | $f$ | 10,1 | мм |
| 84 | $t$ | 21,4 | " |
| 85 | $f/t$ | 0,473 | — |
| 86 | $K_ж$ | 113 | — |
| 87 | $R$ | 04 | см |
| 88 | $l_л$ | 329 | |

**XIII Ток и мощность**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 89 | $s_я$ | 4,5 | а/мм² |
| 90 | $I$ | 955 | а |
| 91 | $P$ | 110 | квт |
| 92 | $AS$ | 390 | а/см |

**VII Эскиз паза и зубца якоря**

13,7  4,1  40,0  10,7  9,7

**IX Проверка магнитной цепи.**

| | | Хол ход | Нагрузка | |
|---|---|---|---|---|
| 62 | $E$ | 115,0 | 121,9 | в |
| 63 | $\Phi$ | 228 10⁶ | 242 10⁶ | мкс |
| 64 | $B_в$ | 7940 | 8450 | гс |
| 65 | $B_з$ | 19000 | 20200 | " |
| 66 | $B_m$ | 5620 | 5850 | " |
| 67 | $k_р$ | 12 | 12 | — |
| 68 | $B_г$ | 12600 | 13400 | гс |
| 69 | $B_с$ | 11400 | 12100 | " |

**XI Укладка жестких секций**

| | Поз. | По ширине | По высоте |
|---|---|---|---|
| Секции-лента х б ½ н 1р | 1 | 4 3 015=1,80 | 4 2 0,15=120 |
| Катушки-микафолий 2¼ сл | 2 | 4 0,15= 0,60 | 5 2 015=1,50 |
| — — картон эл-из 1¼ сл | 3 | 2 0 10= 020 | 2 3 010=060 |
| Паз- —"— —"— 1¼ сл | 4 | 2 0,20= 040 | 3 020= 0,60 |
| Между слоями картон эл из | 5 | — | 0,40 |
| На дно паза - —"— —"— | 6 | — | 0,40 |
| Под клин - —"— —"— | 7 | — | 040 |
| Зазор на укладку не менее | 8 | 0,30 | 040 |
| Медь голая 244×7,4 | 9 | 3 244 - 732 | 4 7,4 =29,60 |
| Итого | | 1062 | 35,10 |

**XIV Намагничивающая сила главных полюсов**

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 93 | $k_в$ | 1,22 | 1,22 | — | 98 | $F_в$ | 5430 | 5770 | ав |
| 94 | $H_з$ | 155 | 248 | ав/см | 99 | $F_з$ | 1240 | 1986 | " |
| 95 | $H_m$ | 1,4 | 1,6 | " | 100 | $F_m$ | 38 | 43 | " |
| 96 | $H_г$ | 9,7 | 12,4 | " | 101 | $F_г$ | 255 | 327 | " |
| 97 | $H_с$ | 114 | 13,0 | " | 102 | $F_с$ | 473 | 539 | " |
| | | | | Итого | 103 | $F$ | 7436 | 8665 | " |

**XV Обмотки главных полюсов**

а) параллельная

| | | | |
|---|---|---|---|
| 104 | $\Delta U$ | 20 | в |
| 105 | $E$ | 121,9 | " |
| 106 | $b_{ср}$ | 30 | см |
| 107 | $l_в$ | 735 | " |
| 108 | $s_ш$ | 2,0 | а/мм² |
| 109 | $k_ш$ | 06 | — |
| 110 | $w_ш$ | 447 | — |
| 111 | $I_ш$ | 83 | а |
| 112 | $q_ш$ | 42 | мм² |
| 113 | $d_ш$ | 156×283 | мм |
| 114 | Марка пров | ПБД | |
| 115 | $d_ш$ | 183×31 | мм |

б) последовательная

| | | | |
|---|---|---|---|
| 116 | $w_с$ | 1 | — |
| 117 | $s_с$ | 26 | а/мм² |
| 118 | $a_с$ | 2 | — |
| 119 | $q_с$ | 175 | мм² |
| 120 | $d_с$ | 7×25 | мм |
| 121 | Марка пров | голый | |
| 122 | $d_с$ | — | мм |
| 123 | $l_в$ | 720 | см |

**XVI Обмотка добавочных полюсов**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 124 | $a_д$ | 2 | — |
| 125 | $w_д$ | 13 | — |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 126 | $s_д$ | 30 | а/мм² |
| 127 | $q_д$ | 154 | мм² |
| 128 | $d_д$ | 7×22 | мм |
| 129 | Марка пров | голый | |
| 130 | $d_д'$ | — | мм |
| 131 | $l_в$ | 590 | см |

**XVIII. Щетки**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 144 | $n_п$ | 6 | — |
| 145 | $n_щ$ | 4 | — |
| 146 | Марка щеток | ЭГ-4 | |
| 147 | $s_щ$ | 10 | а/см² |
| 148 | $q_щ$ | 795 | см² |
| 149 | $l_щ$ | 30 | мм |
| 150 | $b_щ$ | 25 | " |

**XVII Сопротивления и веса обмоток**

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 132 | $r_я$ | 000272 | ом | 136 | $G_я$ | 61,5 | кг | 140 | $G_я'$ | — | кг |
| 133 | $r_ш$ | 8,2 | " | 137 | $G_ш$ | 740 | " | 141 | $G_ш'$ | 770 | " |
| 134 | $r_с$ | 000022 | " | 138 | $G_с$ | 135 | " | 142 | $G_с'$ | — | " |
| 135 | $r_д$ | 000131 | " | 139 | $G_д$ | 630 | " | 143 | $G_д$ | — | " |

| Рассчитал (Подпись) 19 26/IX 51 | Проверил (Подпись) 19 27/IX 51 | Обмоточная записка № 123 19 27/IX 51 |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| (*Наименование предприятия*) | **Обмотки якоря и полюсов машины постоянного тока**<br>Типа ______ № ______ завод-изготовитель *неизвестен*<br>заказ № *789* ______ заказчик *Леспромхоз № 1*<br>Исполнение *защищенный с самовентиляцией* | Обмоточная записка<br>*№ 123*<br>Лист *1* всего *1* л |

| Номинальные данные | Режим работы | квт | вольт | ампер | об/мин. | Действие |
|---|---|---|---|---|---|---|
| до перемотки | *двигатель* | — | — | — | — | — |
| после перемотки | *генератор* | *110* | *115* | *955* | *800* | *продолжительное* |

| | Наименование | Якорь | Парал. возбужд | Послед. возбужд | Добав. полюса | Примечании |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Тип обмотки | *петлевая* | — | — | — | *Щетки ЭГ-4 25×30 по 4 шт на 6 пальцах, всего 24 шт.*<br><br>*Уравнительные соединения 21 шт ПБД 2,44 × 3,53* |
| 2 | Число секций | *189* | — | — | — | |
| 3 | Частичные шаги | *30/29* | — | — | — | |
| 4 | Полный шаг | *1* | — | — | — | |
| 5 | Число катушек | *63* | *6* | *6* | *6* | |
| 6 | Число витков в катушке | *3* | *447* | *2* | *13* | |
| 7 | Число парал. ветвей | *6* | *1* | *2* | *2* | |
| 8 | Число парал сечений | *2* | *1* | *1* | *1* | |
| 9 | Форма сечения | *прямоугольн.* | *прямоугольн* | *прямоугольн.* | *прямоугольн.* | |
| 10 | Марка проводника | *голый* | *ПБД* | *голый* | *голый* | |
| 11 | Размеры без изол, *мм* | *2,44 × 7,4* | *1,56 × 2,83* | *7 × 25* | *7 × 22* | |
| 12 | Размеры с изол, *мм* | — | *1,83 × 3,1* | — | — | |
| 13 | Длина витка, *мм* | *1038* | *735* | *720* | *590* | |
| 14 | Сопротивл при 15° С, *ом* | *0,00272* | *8,2* | *0,00022* | *0,00131* | |
| 15 | Вес меди без изол, *кг* | *61,5* | *74,0* | *13,5* | *63,0* | |
| 16 | Вес меди с изол, *кг* | — | *77,0* | — | — | |
| 17 | Изоляция по черт № | *3А 987* | — | — | — | |

| | | |
|---|---|---|
| Рассчитал *26 IX 1951 г.*<br>(*Подпись*) | Проверил *27/IX 1951 г*<br>(*Подпись*) | На основании формуляра<br>*№ 456 26/IX 1951 г* |

Редактор *В. И. Зимин*
Технический редактор *А. А. Забродина*

Сдано в произв. 2/IV-52 г. Подп. к печ. 2/VII-52 г.
М-33753 Печ. л. 10. Бум. л. 5.
Уч.-изд. л. 12,4. Формат 60×92 1/16.
Тираж 10 000. Заказ 1186.
Цена 6 р. 20 к. по прейскуранту 1952 г.

Типография № 2 Ленгорполиграфиздата
Ленинград, Социалистическая, 14.

Цена 6 р. 20 к.

Г. К. ЖЕРВЕ

# РАСЧЕТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПЕРЕМОТКЕ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ